



应用光学课程基于工程项目的“自顶向下” 案例式教学实践

李 琨¹, 伍 波²

(1. 电子科技大学 光电科学与工程学院, 成都 610054; 2. 成都信息工程大学 光电工程学院, 成都 610225)

摘要: 应用光学课程是光学及光电信息相关专业的核心课程。传统教学方式以课堂讲授为主, 通过课后习题对基础知识点进行练习和巩固, 对工程认证课程体系中的“解决复杂工程问题”这一能力预期目标点的帮助有限。该文提出基于工程项目案例的“自顶向下”的教学模式, 引入教学案例“线扫描广域眼底相机”, 将课程各部分基础原理融入具体光学系统的各个模块及或关键元件中讲述; 以工程实践案例为总线, 引领各部分内容逐渐展开, 通过分析各模块之间的关联关系, 引导学生形成科学思维模式。同时引入仿真实践案例“激光雷达光学收发系统”, 进行光学系统分析和设计的工程实训, 进一步深化基础原理的理解, 提升工程实践能力。

关键词: 工程教育; 自顶向下教学方式; 案例式教学; 光学设计

中图分类号: G642; O439

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240289

“Top-Down” Teaching Practice of the Course of Applied Optics Based on Engineering Projects

LI Kun¹, WU Bo²

(1. School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. College of Optoelectronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: The course of Applied Optics serves as the cornerstone for majors in optics and optoelectronic information. The conventional pedagogical approach primarily emphasizes in-class instruction, with post-lecture exercises aimed at reinforcing fundamental knowledge points. However, this method offers limited support towards achieving the desired outcome of “solving complex engineering problems” within the engineering certification curriculum system. This paper advocates for a “top-down” teaching model based on engineering project cases, introducing the instructional case of “line scan wide field fundus camera”. It integrates the fundamental principles of each course component into specific optical system modules and key components. Engineering practice cases are utilized to guide the gradual development of each content aspect, fostering students’ adoption of a scientific thinking model. Furthermore, a simulation practice case involving “LiDAR optical transceiver system” is introduced to facilitate practical training in the optical system analysis and design, thereby deepening comprehension of basic principles and enhancing engineering practice proficiency.

Key words: engineering education; top-down teaching method; case teaching; optical design

应用光学是光学及光电信息相关专业必修的专业核心课程, 也是激光原理、光纤通信等诸多光学专业课程的先修课程。课程主要包括光线的传播规律、典型光学系统的成像特性、光度学基础、像差现象及像质评价方法等内容。

应用光学作为电子科技大学工程认证体系课

程之一, 课程的教学目标是使学生理解和掌握光学系统的基本概念、原理, 形成光电科学与工程领域的基础理论体系; 能够运用基础原理解释光电信息科学与工程相关的各类物理现象; 能够根据简单的应用要求提出适当的成像系统设计、优化方案。在此基础上, 培养学生基于科学原理并

收稿日期: 2024-05-28

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目(221003880112522)。

作者简介: 李琨, 博士, 讲师, 主要从事高功率激光技术、光学设计方面的研究。E-mail: anryco@sohu.com

采用科学方法对复杂工程问题进行研究的能力, 包括设计实验、分析数据、通过信息综合得到合理有效的结论等。

目前, 应用光学课程的课程体系及课程使用的教材, 如《应用光学》^[1-2]《工程光学》^[3], 内容主要侧重于基本原理。传统教学方式以课堂讲授为主, 通过课后习题对基础知识点进行练习和巩固, 通过课堂讨论对重点或难点进行深化。教学内容的安排, 一般按照几何光学基本原理、共轴球面系统物像关系、平面镜棱镜系统、成像光束的选择(光阑)、光度学基础、光学系统成像质量评价、典型光学系统的顺序进行, 是从单元部件(透镜、光阑、平面镜、棱镜)到整体光学系统(典型光学系统)的“自底向上”模式。该教学模式着重基础原理的介绍, 典型光学系统作为基础原理深化和拓展。学生在前几章单元部件的学习过程中, 对单独光学元件的实际用途的理解会有所欠缺。如孔径光阑对光束的限制作用及入瞳、出瞳的概念, 学生的理解局限于能从概念上解释或者能完成习题。部分概念(如视场角与孔径角、出瞳距与工作距等)在单独介绍时学生容易混淆。此外, 前几章内容针对光学元件单独进行介绍, 各部分内容相对独立, 没有特别强的关联性, 没有形成系统的整体概念, 学生不容易理解相关原理及光学元件的实际用途。目前应用光学课程配套的实验, 主要是利用现成的光学元件进行光路调试训练、基本原理的验证(如透镜成像规律、基点的测量), 或者学习现成光学系统的使用(如望远镜、显微镜), 未开展光学系统设计的实训。光电科学与工程学院近5年应用光学课程工程认证达成度评价结果显示, 工程认证中“能够将数学、自然科学、工程基础和专业知识用于解决复杂工程问题”这一能力预期目标点, 测评平均得分与其他能力相比相对较低。

为了提升学生的工程实践能力、培养创新思维, 本文提出了基于工程项目的案例式教学, 采用“自顶向下”的教学模式, 从实际光学系统出发, 介绍系统各部件主要功能、主要光学原理, 全程调动学生的主动思维。结合光学设计软件, 对系统结构或光学现象进行演示^[4], 引入光学设计过程的介绍和实训, 培养学生解决复杂工程问题的能力。

1 “自顶向下”的教学模式

自顶向下是一种先整体后局部的设计方法^[5], 是工业产品、建筑、计算机编程等领域常用的设计思路。该方法先明确系统功能及总体要求, 再细化结构部件或功能模块, 各部分相互关联、便于协同修改, 可提高设计过程的效率。“自顶向下”的教学模式用于模拟电路、计算机网络等课程的教学实践过程中, 已显示出良好的教学成效^[6-9]。

应用光学课程“自顶向下”的教学模式及教学流程如图1所示。

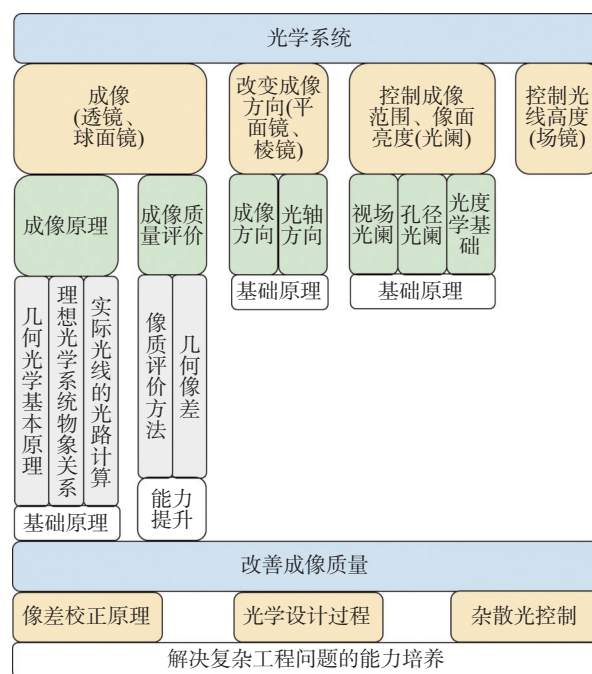


图1 应用光学课程“自顶向下”的教学流程图

该教学模式的总体思路是先引入一个实际的光学系统作为“顶”, 该系统的主要结构部件包括成像元件(透镜、球面镜)、转像元件(平面镜、棱镜)、控制视场及孔径角的光阑、用于减小后方光线高度的场镜等。接下来, 逐一介绍系统各个功能部件的主要功能及其原理。在此基础上, 从工程应用的角度, 引导学生分析和理解像差对成像质量的影响、主要形成机理、校正方法。作为拓展, 介绍光学设计过程及其他实际需要考虑的问题(如光学系统杂散光对成像的影响及其控制), 对学生解决复杂工程问题的思维能力进行训练。

应用光学课程有大学物理作为先修课程, 学生已经有成像、薄透镜物像关系、光线折反射定律等基础概念, 先给出一个实际光学系统的整体

结构、介绍系统总体功能，对学生而言是容易接受的。逐一介绍系统各个功能部件的主要功能及其原理时，主要按照课程大纲要求的教学内容展开，把系统各个功能部件作为工程实例进行展示和分析，并且在工程实例的基础上设置与大纲内容切合的习题或课堂讨论。

“自顶向下”教学模式的主要优点在于，教学过程中，将各元件始终放到系统中，强化其在系统中的功能的理解，而并不是简单讲述原理和概念，同时可以紧密结合实际光学系统设置问题，以课前调研、课堂讨论等多种形式引发学生主动思考，更深入地理解原理、理解光学设计的思路及过程。

在实际教学中，作为“顶”的整体光学系统，可采用常规的望远镜、显微镜等系统。我们选择了线扫描广域眼底相机、激光雷达收发天线两个系统。其中，广域眼底相机主要包括目镜系统、成像系统、照明系统，还需结合人眼进行分析，可全面覆盖课程内容，教学过程中引导学生自行总结思维导图，对理解课程内容有很大的帮助。激光雷达收发天线是单一波长系统，可与望远镜系统类比，原理及设计较为简单，作为设计和优化光学系统的实例，布置为课程设计作业课后完成，培养工程实践能力。

2 教学设计及工程实例

2.1 教学案例：线扫描广域眼底相机

在“自顶向下”模式的教学过程中，选择了一个可以全面覆盖应用光学课程内容的光学系统作为“顶”——线扫描广域眼底相机。

眼底相机是眼科疾病诊疗及研究领域的重要仪器。传统的眼底照相视野只有 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ ^[10]。糖尿病等疾病会引起周围视网膜的广泛病变，而传统眼底相机无法检测到这些病变，必须采用宽视场和超宽视场技术，扩大可照相的视网膜视场。线扫描共聚焦成像与普通眼底相机相比具有成像清晰度高优势，与点扫描共聚焦成像方式相比，其结构相对简单、扫描速度更快^[11]。因此，线扫描广域眼底相机是眼底检查设备的一个重要研究方向。目前，商用眼底相机，如蔡司 Clarus 500 线扫描眼底相机，拍摄的图像单张视场 133° ，图像拼接后可覆盖视网膜表面 242° ^[12]。线扫描广域眼底相机由于视场很大，边缘视场像差的校正是主

要难点之一，此外眼底均匀照明、减小眼角膜反射光也是实际应用中需要着重解决的问题。

线扫描广域眼底相机光学系统的结构原理如图 2 所示，其中，A、B、C 均为眼底的共轭面，B 也是照明光源经柱面透镜聚焦后形成的线光源的位置。光学系统包含照明和成像 2 条光路，分为照明、扫描、成像、接目镜 4 大模块，包括分光棱镜、平面反射镜、柱面透镜等光学元件，需结合人眼光学系统进行分析^[13]。

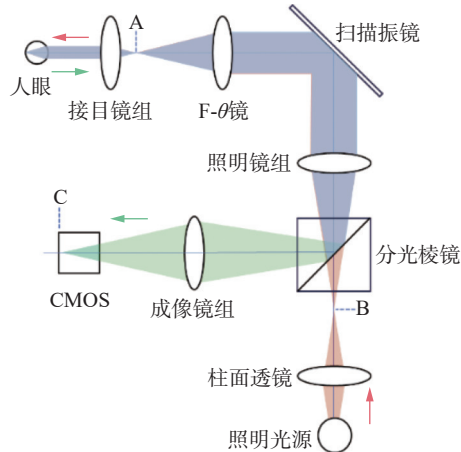


图 2 线扫描广域眼底相机光学系统结构图

教学过程设计如图 3 所示，图中给出了该教学案例与课程知识点、工程认证能力点培养目标之间具体对应关系，同时也可作为学生学习时的思维导图。

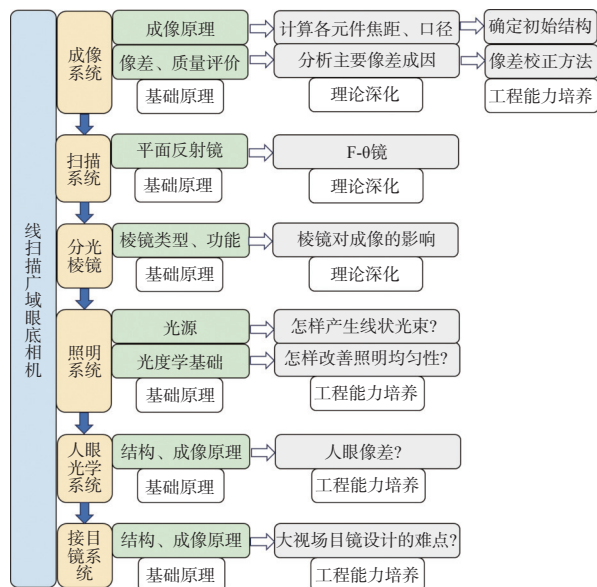


图 3 教学过程设计图

教学过程中，首先概述线扫描广域眼底相机的主要构成及功能，再介绍其光学系统的 4 大模

块、功能元件及人眼光学系统。课程内容始终以该工程案例为牵引, 各部分按照图3所示顺序展开, 一一对应并且全面涵盖应用光学课程教材内容。

在成像系统部分, 首先介绍基础原理几何光学基本原理及共轴球面系统物像关系, 在此基础上, 设置与该工程实例直接相关的计算练习题, 对基础原理加深理解和应用, 如给定眼底分辨率(最小分辨距离或线对数)、视场角度、接目镜组、F- θ 镜、照明镜组的焦距, 按照理想光学系统计算 B 处线光源的宽度及长度, 计算照明光路中各元件的口径。经计算可知, 接目镜物方视场角为 90° 时, 扫描镜头、照明镜头及成像镜头的视场角均约为 15° , 镜头的口径约 20 mm。焦距 50 mm、 $f/3.5$ 的成像镜头结构如图4所示^[11]。

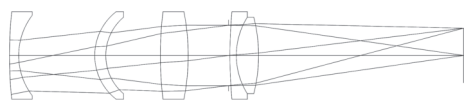


图4 焦距 50mm、 $f/3.5$ 的成像镜头结构图

此后介绍像差现象、像质评价方法的基础原理, 针对以上成像镜头结构, 给出不同视场角情况下的像差, 具体分析各种像差的现象及成因。设置课程设计题目, 引导学生了解光学设计流程、思考像差校正方法, 培养学生解决工程能力。根据瑞利判据, 像平面上两个衍射光斑中心间隔等于艾里斑半径时, 两个衍射光斑恰好可分辨, 此时, 调制传递函数(modulation transfer function, MTF)值为 0.15。图4所示成像镜头的调制传递函数如图5所示, T、S 分别表示子午、弧矢光线。由图5可见, 在物镜物方视场为 28° , 空间频率为 200 lp/mm 时的 MTF 值为 0.2。独立的成像镜头成像质量远高于眼底照相机的国家标准, 但系统总的成像质量需结合其他元件综合分析。

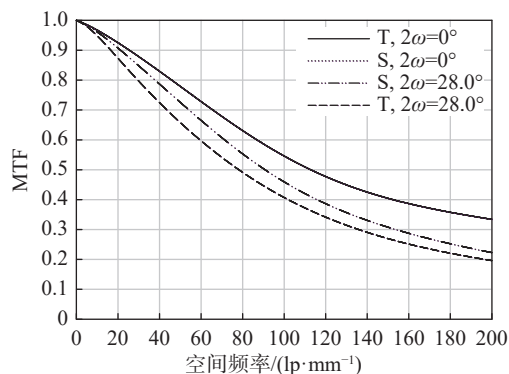


图5 调制传递函数

在扫描系统及分光棱镜部分, 介绍平面镜、棱镜系统, 基础原理是平面镜成像特性、棱镜类型及功能, 作为扩展内容介绍 F- θ 镜、偏振分光棱镜、鲍威尔棱镜, 棱镜对成像的影响作为讨论内容加强理解。

在照明系统部分, 先介绍光度学基本量基础原理, 补充介绍不同类型的光源, 在此基础上, 结合改工程实例, 引导学生思考产生线状光束的方法以及影响照明均匀性的因素, 以课后调研报告的形式布置给学生并且进行课堂讨论。

在人眼光学系统部分, 先介绍人眼的结构及成像特性, 引导学生根据 Gullstrand 人眼模型, 运用光学仿真计算软件或者根据光路计算的方法手动计算人眼的焦距, 分析人眼晶状体曲率半径变化对眼底实际成像位置的影响、讨论校正方法, 从而理解近视、远视的成因及人眼屈光度缺陷的校正。进一步可结合广域眼底相机的实例, 计算成像范围可全眼底覆盖时人眼的视场范围、分析大视场情况下人眼像差。

接目镜系统部分, 首先结合教材内容介绍常用的目镜结构, 如惠更斯目镜、冉斯登目镜、凯尔纳目镜、艾尔弗目镜等, 这些目镜的视场角在 $35^\circ \sim 70^\circ$ 之间。在广域眼底相机的应用实例中, 为了实现瞳孔处视场角约 90° (对应以视网膜球心度量的眼内视场角为 135°) 的超广角眼底成像, 接目镜的视场角应该达到 100° , 传统结构接目镜无法适用。目前, 商用超广角目镜可达到视场角 100° , 如美国天文望远镜制造商 Televue Optics 生产的“Ethos”目镜, 由 6 组 9 片玻璃镜片构成, 结构较为复杂。利用非球面镜可以将接目镜镜头结构简化^[14-15]。教材基础原理与工程应用实例相结合, 引导学生分析视场进一步增大时, 目镜设计的困难和解决方法。

系统各部分的分析过程中, 根据不同情况介绍对光束的限制, 即各种光阑的作用。如在成像部分, 根据眼底相机使用的成像元件 CMOS 介绍像方视场; 在人眼光学系统部分, 人眼眼底范围决定物方视场, 人眼瞳孔作为系统的孔径光阑, 介绍入瞳、出瞳及其在系统中的作用; 在照明系统部分, 介绍消杂光光阑。作为拓展, 介绍点扫描、线扫描共聚焦成像方式在消除杂散光、提高成像清晰度方面的作用。

在“自顶向下”的教学过程中, 以工程实践

案例为总线，引领各部分内容逐渐展开，光学系统各模块与课程内容一一对应，各模块之间也相互关联，通过分析这些关联关系，可以使形成科学思维模式、培养工程实践能力。如接目镜的设计或选择需要考虑人眼的成像特性、接目镜与人眼及后续 F- θ 镜的光瞳衔接；照明系统线扫描光源的设计，既要考虑线光源在眼底的扫描长度和宽度、也要考虑光源在眼底的照度。总之，通过广域眼底相机教学案例，课程各部分内容可有机融合，促使学生从工程实践角度全面分析和思考问题。

基于工程实践项目的自顶向下案例式教学过程，是工程教育 PBL(problem-based learning)理念的实践。教学过程体现了原理的理论分析、工程化问题解决思路及方法的引导、结论分析及改进的方法引导、实际工程问题的实现途径引导等，从多个环节培养学生的主动学习及解决实际工程问题的能力，培养批判性思维能力，提高学生教学过程中的参与度、提高学习兴趣^[4]。

在讲授和讨论教学案例的基础上，进一步引入实践案例，进行光学系统分析和设计的工程实训。实践案例可选择线扫描广域眼底相机光学系统的一个单元开展，如接目镜组的设计、照明镜组等，也可以选择其他应用的光学系统。以下给出的实践案例是激光雷达光学收发系统中的扩束单元，其结构较为简单，激光光源单色性好，作为学生工程实践练习难度适中。

2.2 实践案例：1.5 μm 大气探测激光雷达光学收发系统

大气探测激光雷达一般由激光光源、扫描系统、光学收发系统、信号处理系统等部分组成，通过检测待测区域大气对信号光的后向散射，可实现温湿度、气溶胶浓度、污染物成分、PM_{2.5} 值等多种大气参数的高精度远程测量。1.5 μm 工作波长对人眼安全、大气穿透能力强，可实现全光纤结构。激光雷达光学收发系统整体结构如图 6 所示，用于激光的准直扩束、压缩发散角，包含准直系统、扩束系统及分光棱镜等，直接决定返回光信号与背景干扰的强度比，是激光雷达的核心部件之一。

教学过程中，以 1.5 μm 大气探测激光雷达光学收发系统^[16-17] 中扩束单元作为工程实例，引导学生开展光学设计练习。光学收发系统具体参数

要求如下：光源为波长 1.55 μm 光纤激光器，经准直后光束直径为 4.6 mm，要求设计扩束透镜组，使输出光束直径为 100 mm，扩束倍数为 22 倍。为简化问题，扩束系统入射光束视为几何光学的平行光束。

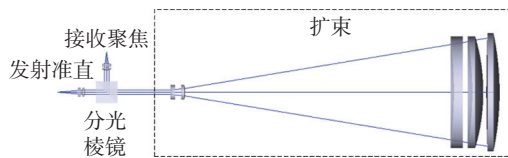


图 6 光学收发天线整体结构图

系统设计过程分为 3 个主要步骤，如图 7 所示。第 1 步，对设计要求进行分析。

第 2 步为光学系统初始结构的确定及结构优化，结合课程内容(主要是望远镜部分)，根据扩束比和光束口径要求进行计算，结合文献查阅，确定扩束系统初始结构。由于扩束系统为无焦系统，在实际设计过程中可以在最后一面之后加入理想透镜，通过理想透镜焦面上的光程差图来判断优化后的成像质量。根据成像质量的要求确定优化过程中操作数。优化后的系统需要根据光学加工厂家提供样板参数进行匹配，进一步优化微调，然后进行公差分析和修正。

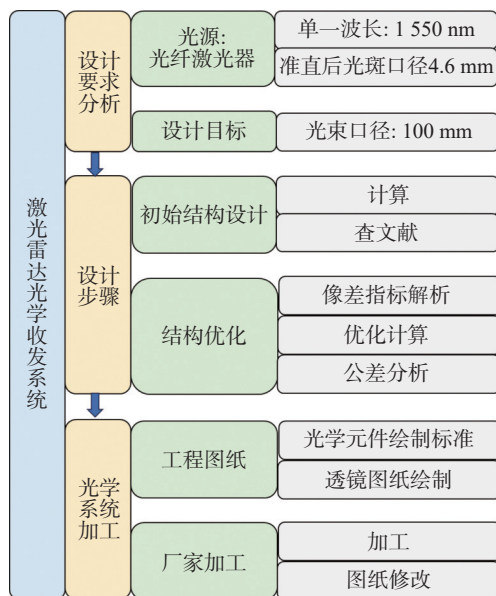


图 7 激光雷达光学收发系统光学设计实践过程

第 3 步，根据光学元件绘图标准，绘制透镜加工图纸，联系厂家加工。虽然最后一步与应用光学或光学设计的理论关联不大，但对于学生的工程实践能力及沟通解决问题能力有很好的锻炼。

3 结束语

针对应用光学课程常规教学中学生将基础及专业知识用于解决复杂工程问题的能力发展滞后的问题, 提出了以工程实践案例带动基础原理学习的“自顶向下”的教学模式, 选择了2个案例开展理论及实践教学。通过2.1节案例(广域线扫描眼底相机)的各部分结构及功能的介绍, 逐一对应课程各部分基础原理, 同时让学生理解各单元结构在光学系统中的功能、各结构单元之间的相互关联, 理解光学设计的原理及思路, 而不仅仅是会做习题。2.2节案例(激光雷达光学收发系统)结构简单, 作为学生的课程设计或工程实践练习题目难度适中, 通过实际动手开展简单的光学设计, 巩固基础知识, 培养主动思考习惯及创新思维能力。激光雷达光学收发系统还涉及激光高斯光束的传输变换, 可考虑将该系统加入光学实验教学, 同时服务于应用光学和激光原理两门课程。

参考文献

- [1] 李林. 应用光学[M]. 4版. 北京理工大学出版社, 2010.
- [2] 张以漠. 应用光学[M]. 5版. 电子工业出版社, 2022.
- [3] 郁道银. 工程光学[M]. 4版. 机械工业出版社, 2022.
- [4] 李琨, 伍波. 基于虚拟仿真实验的“应用光学”工程教育实践[J]. 实验科学与技术, 2022, 20(2): 33-37.
- [5] 库罗斯. 计算机网络自顶向下方法[M]. 4版. 机械工业出版社, 2009.
- [6] 周金芳, 吴叶飞, 金向东, 等. 模拟电路自顶向下教学体系初探[J]. 工业和信息化教育, 2020(3): 84-88.
- [7] 王兴芳, 张金区, 曹阳, 等. 计算机网络课程的自顶向下教学[J]. 计算机教育, 2017(11): 87-90.
- [8] 高翔. “新工科”背景下通信类课程实验实践教学体系研究[J]. 教育教学论坛, 2020(45): 385-387.
- [9] GUEST M, LE D T H. Top-down versus bottom-up pedagogy: Applications in the East Asian ESP classroom[J]. Journal of English for Academic Purposes, 2024, 68: 101362.
- [10] 陈蔚霖, 常军, 赵雪惠, 等. 广域眼底相机光学系统的设计与仿真分析[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 814-821.
- [11] 刘星宇, 肖昀, 季林, 等. 激光线扫描超广角共聚焦眼底成像[J]. 中国激光, 2023, 50(21): 113-122.
- [12] LUCENTE A, TALONI A, SCORCIA V, et al. Widefield and ultra-widefield retinal imaging: A geometrical analysis[J]. Life, 2023, 13: 202.
- [13] MILTON L. 周海宪, 程云芳, 译. 光学系统设计[M]. 4版. 机械工业出版社, 2012.
- [14] 李桂萍, 汪霄. 用于改进眼科成像的光学系统[P]. CN116909002A, 2023-09-06.
- [15] 郭雨桐, 常军, 胡瑶瑶, 等. 基于自由曲面的高倍率广角显微目镜设计[J]. 物理学报, 2020, 69(9): 148-155.
- [16] 刘宇承, 王春泽, 宋有建, 等. 适用于高精度激光测距的光学系统设计[J]. 应用光学, 2022, 43(2): 191-197.
- [17] 徐婉莹. 基于 Fizeau 干涉仪的风场温度探测激光雷达系统设计与仿真研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.

编辑 钟晓