

基于虚拟仿真的“现代工程光学”教学内容的探索

孔梅梅

(南京邮电大学电子与光学工程学院柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023)

摘要 为培养光电领域的专业学位硕士研究生能够掌握扎实的专业基本理论,并具有一定的工程实践能力以及有关光电系统的设计能力,笔者基于理论与实践相结合的理念,在“现代工程光学”课程的教学内容设计方面作了一定的探索。在本课程中通过引入虚拟软件 Zemax 的仿真,结合当代科技发展的最新动态分析,可以在理论教学中更直观形象地使学生掌握好相关的基础知识,在上机实践教学中更直接地锻炼学生的设计能力和综合素质,对培养研究生满足新时代科技发展的人才要求具有一定的教学参考价值。

关键词 虚拟仿真;教学内容设计;实践教学;Zemax 软件

EXPLORATION OF TEACHING CONTENT OF “MODERN ENGINEERING OPTICS” COURSE BASED ON VIRTUAL SIMULATION

KONG Meimei

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Jiangsu, Nanjing 210023)

Abstract Based on the concept of combining theory with practice, in order to cultivate the professional degree postgraduates in the field of optoelectronics to master solid professional basic theories, and have certain engineering practice ability and design ability of optoelectronic systems, some explorations have been made in the design of teaching content of “Modern Engineering Optics” course. In this course, with the simulations of virtual software Zemax, combined with the latest dynamic analysis of the development of contemporary science and technology, students can master the relevant basic knowledge more intuitively and vividly in theoretical teaching, and exercise students’ design ability and comprehensive quality more directly in computer practice teaching. It has certain teaching reference value for training graduate students to meet the talent requirements of scientific and technological development in the new era.

Key words Virtual simulation; Teaching content design; Practical teaching; Zemax soft

收稿日期: 2023-01-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(61905117)资助。

作者简介: 孔梅梅,女,副教授,主要从事光学设计、视光学、微流控光学等相关研究工作, kongmm@njupt.edu.cn。

引文格式: 孔梅梅. 基于虚拟仿真的“现代工程光学”教学内容的探索[J]. 物理与工程, 2023, 33(5): 81-86, 118.

Cite this article: KONG M M. Exploration of teaching content of “Modern engineering optics” course based on virtual simulation[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(5): 81-86, 118. (in Chinese)

近年来,随着物理研究领域技术的飞速发展,光电信息行业对所需人才也提出了更高的能力要求,尤其对于相关的专业学位硕士研究生而言,不仅要求其掌握扎实的光电技术的基本理论和基础知识,而且还需具有一定的工程实践能力以及有关光电系统的设计能力。目前,虚拟仿真实验教学是我国高等教育信息化建设的重要内容^[1],而案例教学一直是专业学位研究生教学的有效手段^[2],本文基于虚拟仿真软件的引入,结合具体的案例教学,对“现代工程光学”课程的教学内容进行了相应的探索。

“现代工程光学”课程是南京邮电大学电子与光学工程学院电子信息类别专业学位硕士研究生一年级的学位基础课。通过该课程的学习,使学生能够掌握工程光学的基础理论和光学设计基本方法,主要包括几何光学中的基本原理、理想光学系统成像、典型光学系统以及像差基本理论等,物理光学中的光的干涉、衍射、偏振的基本理论及其基本应用等,能够熟练使用 Zemax 光学设计软件,懂得如何利用 Zemax 软件进行光学系统的设计,可为学习本专业后续的专业技术课程、从事光电系统的工程设计和今后课题的科学研究打下坚实的基础。

1 主要教学设计内容及特色

科技领域的进步与发展,离不开理论和实践的结合、科学研究与工程应用的结合^[3]。基于虚拟仿真的应用,将 Zemax 光学设计软件全面应用于“现代工程光学”课程的理论教学和设计实践中,激发学生的学习兴趣,培养学生的实践设计能力。主要教学设计内容为:(1)理论知识的教学方面,结合我国现代科学技术发展近况,通过有关的知识点引出课程中与其相关的基础知识的教学,对于一些抽象的或难以想象的基本概念,利用软件仿真出简洁直观的图形,更易于学生理解;(2)设计实践环节的教学方面,因为光学设计是工程光学学科发展中必不可少的部分,所以,基于理论教学内容,该课程还安排了上机实践教学,基于 Zemax 光学设计软件引入,将理论与实践设计相结合,学生在老师的指导下完成具体的光学系统结构设计、并亲身体验理论知识的实际应用。

2 理论教学与设计实践的案例分析

由于本学院的专业学位硕士研究生在本科期间已通过“大学物理”课程或与光电相关的专业课程等,学习过有关光学方面的最基本的理论知识,但由于时间较长的关系可能有所遗忘,所以,“现代工程光学”课程的理论教学过程中,老师针对这一情况,主要将几何光学和物理光学中理论知识的框架结构和重点、难点进行梳理与讲授,其他的基本理论主要靠研究生自己进行复习或自学,老师辅以答疑即可,这样既可以培养研究生的自学能力,又能够将课程的理论教学内容得以压缩,为后续的设计实践教学留有足够的时间。

根据上述的教学设计主要内容,这里列举了几个相关的案例解析。

2.1 “典型光学系统”中的人眼光学系统

几何光学中的“典型光学系统”内容主要是学习有关目视光学仪器的光学成像原理,而且人眼也是精密的光学系统,所以,结合老师在“我国人眼光学系统模型的建立”有关课题项目的研究基础^[4],根据人眼光学成像结构的特点,利用光学设计软件 Zemax 展示了人眼光学模型光路图,如图 1 所示。

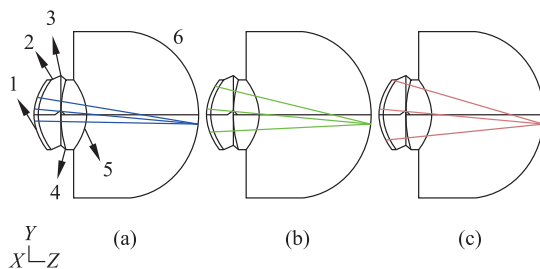


图 1 不同瞳孔直径下的人眼光学模型光路图
(a) 3mm; (b) 6mm; (c) 8mm

图 1 中(a)(b)(c)分别是当瞳孔直径为 3mm、6mm 和 8mm 时的人眼光学模型的光路图,从左向右,第 1、2 个表面表示角膜的前后表面;第 3 个面表示人眼的瞳孔位置,也是系统的光阑位置,因为人眼的瞳孔相对于光轴偏向鼻侧约 0.5mm^[4],所以在第 3 个面中也引入了这一非轴对称特点;第 4、5 个面为晶状体的前后表面;第 6 个面为视网膜,即系统的像面,弯曲的视网膜面型能很好的矫正宽光束的场曲。其中,角膜和晶状体的面型

采用了双二次曲面表示法,角膜的折射率为均匀分布,而晶状体的折射率为梯度渐变分布形式。

结合 Zemax 软件中建立的如图 1 所示的人眼模型,进行有关人眼成像的理论教学,不仅可以更直观得展示出人眼光学系统的成像特性,有利于学生对这部分光学知识点的理解,而且通过拓展有关非球面面型和渐变折射率分布的内容介绍,使得学生对于可从外界获得超 90% 的信息的视觉光学有了更深的认识、引起更多的探索兴趣。

2.2 将“中国天眼”引入望远镜系统与球差的教学

“中国天眼”,是我国具有自主知识产权、用于探索宇宙的单口径球面射电望远镜,全名为“500 米口径球面射电望远镜”,英文名为 Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST),是目前世界最大望远镜,开创了建造巨型射电望远镜的新模式^[3]。可将其引入课程的理论教学中,主要通过以下两个方面。

一方面,学习“典型光学系统”中有关望远镜系统的光学原理时,在获得望远镜的分辨率和孔径正相关的关系后,通过课前发布在教学群里并要求学生已观看的有关视频资料^[5],探讨“中国天眼”的望远本领及其先进性和“时代楷模”南仁东科学家的故事,进而引入课程思政,激发学生的自豪感、社会责任感和担当精神^[6]。而且,还通过最新的新闻报道^[7],了解到:中科院国家天文台利用 FAST 对致密星系群“斯蒂芬五重星系”及周围天区的氢原子气体进行了成像观测,发现了 1 个尺度大约为 2 百万光年的巨大原子气体结构(见图 2),比银河系大 20 倍——迄今为止在宇宙中探测到的最大的原子气体结构,相关成果 2022 年 10.19 日在国际学术期刊《Nature》在线发表^[7],从

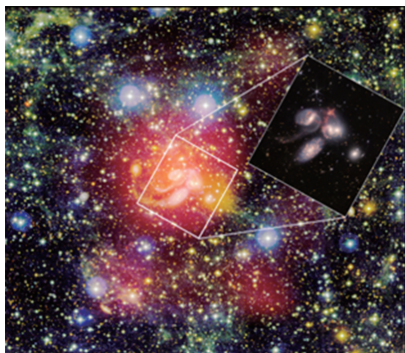


图 2 “中国天眼”探测到的“斯蒂芬五重星系”周围天区的原子气体分布^[7]

而引导学生产生对最新科技发展实时关注的兴趣,激励学生努力学习,争取今后可以获得更多的科研成果,推动我国科技的发展。

另一方面,学习后续的像差理论时,在几何像差中的第一个像差——球差概念的讲授之前,结合前面有关“中国天眼”的视频资料内容^[5],如图 3 所示,当其主动反射面若是球面时,对电磁波的聚焦特性无法形成焦点所以需要采用椭球面这一技术点提出关注与疑问,请学生带着“为什么球面无法形成焦点?”这一问题进入有关球差的学习。最后,通过球差的具体理论知识的学习后,学生可以收获:(1)能够理解球差有关的概念,掌握随着孔径的增大,球面的光线追迹交光轴于不同的位置并与理想像点的偏离程度逐渐增大,所以无法聚于一点形成焦点,从而可以解答这一问题;(2)“中国天眼”的名称虽然是“500 米口径球面射电望远镜”,但其主动反射面其实是非球面的;(3)能够切身体会到高科技实质上是许许多多的专业基本知识的积累与应用,进而激发他们主动学习理论基础的积极性。

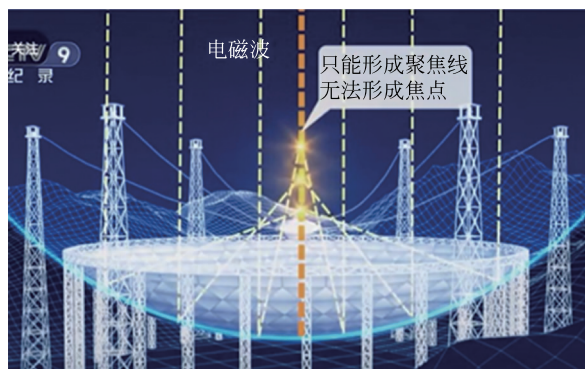


图 3 CCTV9 纪录片《天眼》中主动反射面面型的截图^[5]

2.3 像差理论中抽象概念的直观展示与理解

像差理论是几何光学的难点,不仅由于其包含很多种类的几何像差概念,而且其中存在一些较抽象的、比较难以理解的概念,比如讨论有关轴外光束成像时涉及到“子午平面”“弧矢平面”和“物空间中轴外光线对关于主光线对称的对称性在像空间被打破了”等。但是,作为光学设计的理论基础,像差理论的学习又是至关重要的。所以,利用 Zemax 软件的虚拟仿真可以通过图形的直观展示使得一些相关概念的图像化,便于学生更深入的理解。

如图4所示,在分析轴外光束成像时,根据“子午平面”与“弧矢平面”及其平面内的光束分别为“子午光束”和“弧矢光束”的概念,利用Zemax软件仿真出轴外光束通过正透镜传播时的光路图,就可以直观地展示出相应的概念,使学生形象地了解相关的基本知识。图4(a)是同时显示了当物面的轴外点发出子午光束和弧矢光束入射时,经一个正透镜透射后的光线传播情况,图4(b)和图4(c)分别显示了子午光束和弧矢光束的单独传播情况,而且软件还具有调节图形不同的观察方向,使学生可以从不同的角度去生动直观地观察与理解。

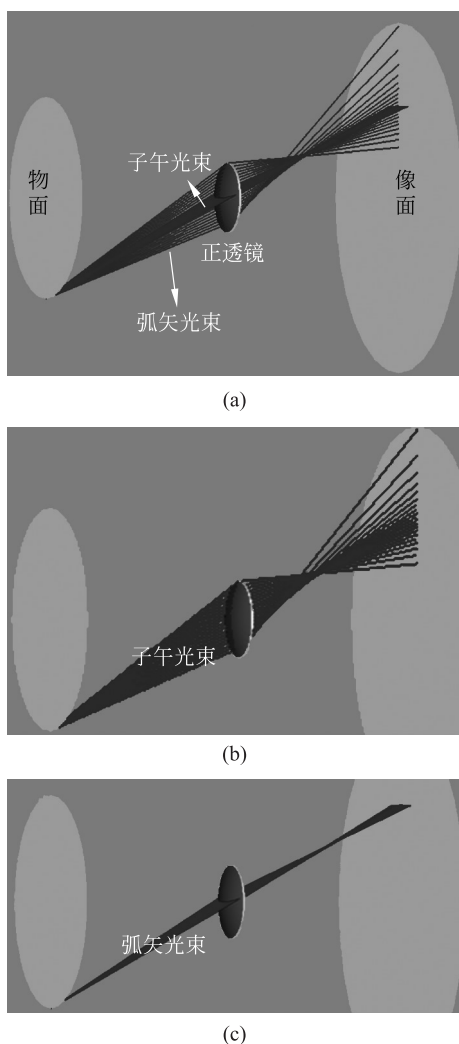


图4 Zemax中的子午平面与弧矢平面及其平面内的光束概念的图像化

(a) 轴外光束成像时子午光束和弧矢光束; (b) 轴外子午光束; (c) 轴外弧矢光束

图5是利用Zemax软件仿真,也是通过当物

面的轴外点发出子午光线和弧矢光线入射时,经过一个正透镜折射后的光线传播情况,得到的关于“轴外光线对在像空间关于主光线对称的对称性被打破”的概念图像化;为了更简洁直观,分别设置了3条光线,最中央的是主光线,两侧两条光线是全孔径光线对,在(a)(b)中分别表示了轴外子午光线对与轴外弧矢光线对的成像情况,可以明显看出,物空间中它们都关于主光线对称的,而在像空间关于主光线对称的对称性消失了(图中画圈之处),而且子午平面和弧矢平面内的这两条光线都相对于中央的主光线存在一定的偏离量,从而就可以轻松地引入与这个偏离量有关的“彗差”的概念教学。

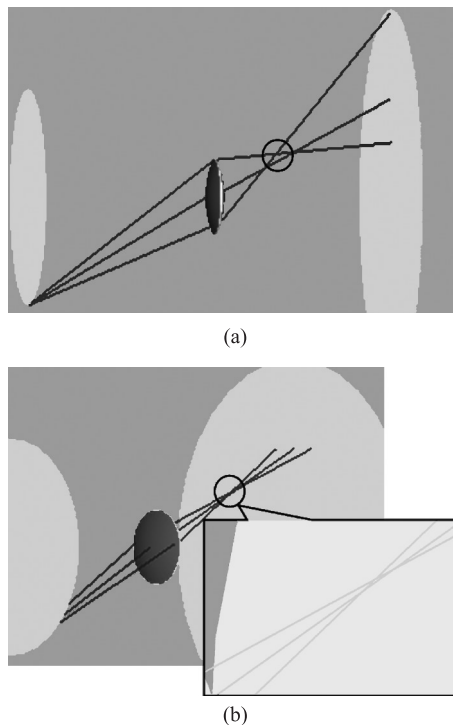


图5 利用Zemax仿真得到的“轴外光线对在像空间关于主光线对称的对称性被打破”的概念图像化

(a) 轴外子午光线对; (b) 轴外弧矢光线对

2.4 光的干涉理论及其图样的改变

物理光学中的学习内容具有理论性较强的特点,公式推导较多,其中,关于干涉理论中除了有关的理论公式较多以外,一些重要的概念,比如“等倾干涉”与“等厚干涉”的理解也容易混淆,因此,可以通过Zemax软件仿真的双光束干涉系统及其干涉图样,使学生直观地理解相应的理论知识及其特点。

利用 Zemax 软件的多重结构功能,可以建立双光束的干涉系统,如图 6(a)所示,点光源通过准直透镜发出平行光束入射,先通过半透半反的分光棱镜,分成两路光:一路光透射至平面反射镜 M_1 ,然后经 M_1 反射再通过分光棱镜的反射最后到达探测屏;另一路光反射至平面反射镜 M_2 ,然后经 M_2 反射再通过分光棱镜的透射最后也到达探测屏,当这两路光满足干涉条件就可以在探测屏上产生相应的干涉图样。这两路光可分别称为参考光路和测试光路(被测件位于该光路中),图 6(b)是 Zemax 软件中分别建立的两个结构,对应于参与干涉的双光路。

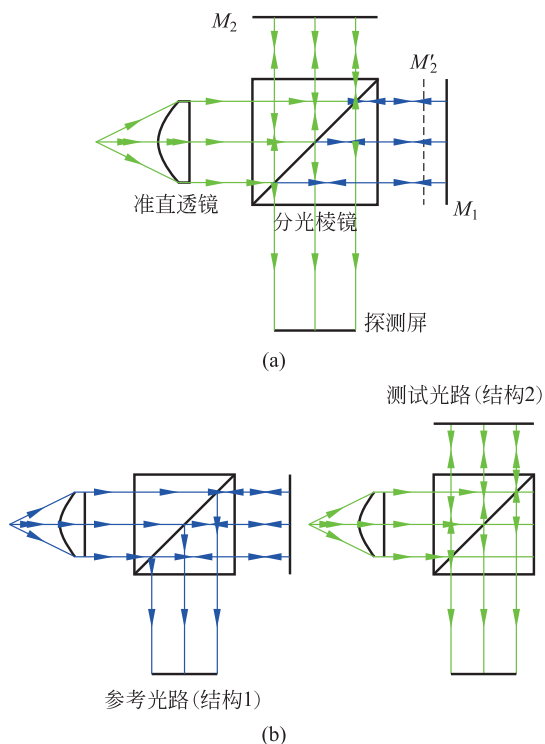


图 6 利用 Zemax 软件的多重结构功能所建立的双光束干涉系统

(a) 利用 Zemax 建立的双光束干涉系统; (b) 该干涉系统的双光路的分别显示

根据双光束干涉的原理可知,该系统可以等效于平面反射镜 M_1 、 M_2' 构成的虚平板, M_2' 是 M_2 经分光棱镜的分光面所成的虚像(见图 6(a))。通过调节 M_1 和 M_2' 的相对位置,当二者轴向上存在距离偏差即构成一平行平板时可产生等倾干涉,当二者存在倾斜角即构成一楔形平板时可产生等厚干涉,相应的干涉图样分别如图 7(a)(b)所示。通过图 6 和图 7 的展示,学生不仅可以更直观地

理解包括迈克尔逊干涉仪在内的所有双光束干涉系统的原理,而且对于易混淆的“等倾干涉”与“等厚干涉”的概念理解也有了更深的对比体会,加强了相关理论的记忆。

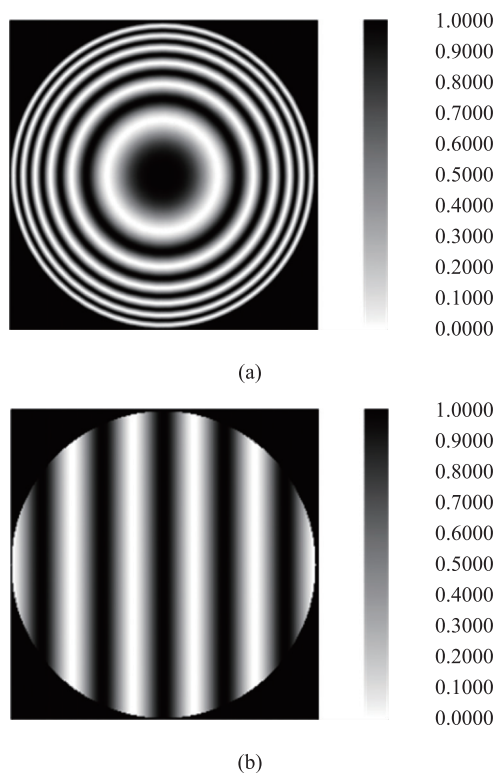


图 7 调节 M_1 和 M_2' 的相对位置获得的干涉图样

(a) 二者轴向上存在距离偏差时产生的等倾干涉; (b) 二者存在倾斜角时产生的等厚干涉

2.5 基于折射式望远镜系统的上机操作设计

基于理论教学中有关折射式望远镜系统(开普勒结构和伽利略结构)的学习,在利用 Zemax 软件进行上机操作设计时,将这两种不同结构的望远镜系统作为设计的主要目标,由简入难,先利用 Zemax 软件中的近轴面设置,从近轴光学系统的设计开始,然后逐步过渡到实际的光学结构(单透镜、双胶合透镜的具体设计流程),最终按照要求完成两种不同结构的望远镜系统的设计,具体的教学设计内容如图 8 所示。

由图 8 可知,在整个上机设计实践过程中,每一个设计环节的实践内容都与课程前期的理论知识密切相关,可以让学生深刻体会到:只有将理论与实践相结合才能设计出符合要求的两种不同结构的望远镜系统,而且,光学设计软件只是工具,作为设计者的我们才是设计的主体,没有掌握相关的

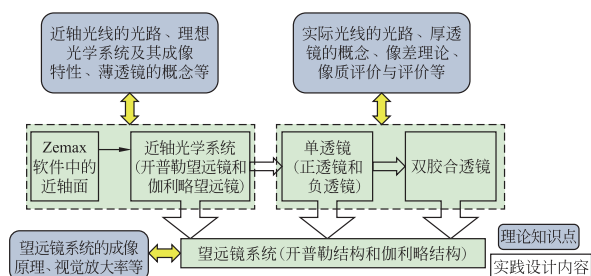


图8 以两种不同结构的望远镜系统作为设计目标的教学内容设计框图

理论基础就无法具备实际的设计能力。同时,在整个设计教学中,要求学生自由分组,每组2~3人共同合作完成每一组不同参数(相对孔径、视觉放大率等)要求的光学系统结构,能够培养学生协同合作的能力。

图9是两组学生完成的视觉放大率 $|\Gamma|$ 分别为6((a)和(b))和5((c)和(d))的望远镜系统,(a)开普勒结构是由双胶合透镜表示的物镜和单正透镜表示的目镜组合而成,(b)伽利略结构是由单正透镜表示的物镜和单负透镜表示的目镜组合而成,该组的物镜和目镜的相对孔径满足要求为1/6.5;(c)开普勒结构中的物镜和目镜都是单正透镜表示的,(b)伽利略结构是由双胶合透镜表示

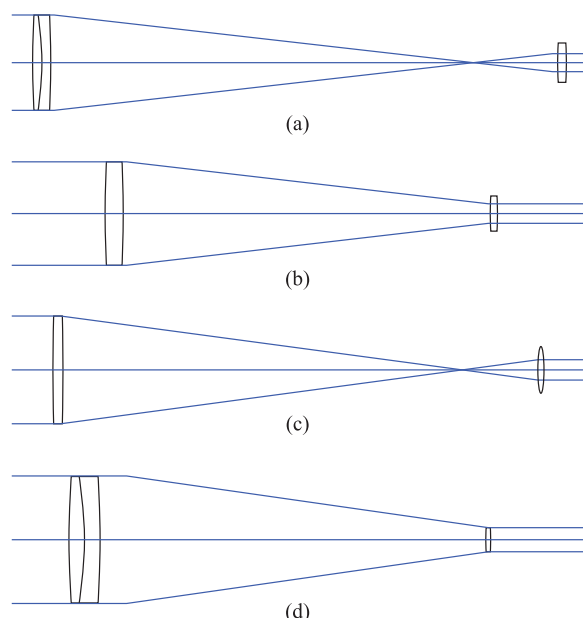


图9 某一组完成的视觉放大率 $|\Gamma|=6$ 的望远镜系统(a)双胶合透镜+单正透镜的开普勒结构;(b)单正透镜+单负透镜的伽利略结构;某一组完成的 $|\Gamma|=5$ 的望远镜系统;(c)单正透镜+单正透镜的开普勒结构;(d)双胶合透镜+单负透镜的伽利略结构

的物镜和单负透镜表示的目镜组合而成,该组的物镜和目镜的相对孔径满足要求为1/5.6。

3 教学实践与效果

基于虚拟仿真的引入,在“现代工程光学”硕士研究生学位基础课的理论教学和实践教学中的具体实施才开始三年,已在最近的三级学生中完成,但教学效果显著;每一级学生在该课程中的最终考核全部顺利通过,具体成绩达到“优秀”等级(90分以上)约有40%~45%,达到“良好”等级(80~89分)约有42%~57%,达到“中等”等级(70~79分)约有3%~13%,说明所有学生都已达到了教学目标要求。而且,有的学生还在今后的课题研究中能够应用所学的光学设计本领,今年在高质量的学术期刊上发表了利用光学设计软件Zemax所做的课题研究内容^[8,9]。

4 结语

在“现代工程光学”硕士研究生学位基础课中,通过光学设计软件Zemax的引入,结合课程有关的科技发展最新动态,在理论教学中通过虚拟仿真使学生更直观深入地理解相关基础知识,引导学生关注科学研究的发展、激发为我国科技的进步而努力的责任感;并将实践与理论相结合,通过实际的上机操作分组完成光学系统的设计,提高学生的设计能力和与他人分工协作的合作能力,可为将本学院的专业学位硕士研究生培养为满足国家光电领域需求的人才打下扎实的专业基础。

参 考 文 献

- [1] 董桂伟,赵国群,王桂龙,等. 高等工程教育虚拟仿真实验教学的分析与思考——基于278项国家级虚拟仿真实验教学项目的描述性研究[J]. 2022,39(12):199-204.
DONG G W, ZHAO G Q, WANG G L, et al. Analysis and thinking of virtual simulation experiment teaching in the field of higher engineering education: A descriptive research based on 278 national virtual simulation experiment teaching projects[J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(12): 199-204. (in Chinese)
- [2] 孟彦龙. 光学工程专业研究生教学案例设计探索[J]. 教育教学论坛, 2019(33): 94-95.
MENG Y L. Design of educational cases for postgraduate education in optical engineering[J]. Education Teaching Forum, 2019(33): 94-95. (in Chinese)

(下转第118页)

确到一阶,微分方程精确到零阶,则得到

$$\Omega'(0) = -\frac{5\mu}{2\sqrt{2}}, v'_c(0) = \frac{\mu}{\sqrt{6}}, \Omega'_1(0) = \frac{\mu}{2\sqrt{2}},$$

$$\omega'_1(0) = \frac{5\mu}{2\sqrt{6}}, \omega'_2(0) = \omega'_3(0) = 0,$$

$$f'_1(0) = f'_2(0) = N'(0) = 0$$

如此一直往下,可以精确到任意阶。例如,代数方程精确到五阶(微分方程要少一阶)时,可得到各量精确到五阶的结果(此时 ω_3 第一次非零):

$$v_c = \frac{\mu t}{\sqrt{6}} - \frac{5\mu^4 t^4}{288\sqrt{2}\Omega_0} - \frac{43\mu^5 t^5}{1152\Omega_0^2}$$

$$\Omega = \Omega_0 - \frac{5\sqrt{3}}{2}v_c, \quad \Omega_1 = \frac{\sqrt{3}}{2}v_c$$

$$\omega_1 = \frac{5\mu t}{2\sqrt{6}} - \frac{25\mu^4 t^4}{576\sqrt{2}\Omega_0} - \left(\frac{\mu^3}{72\sqrt{6}} + \frac{215\mu^5}{2304\Omega_0^2}\right)t^5$$

$$\omega_2 = \frac{5\mu^2 t^3}{36\sqrt{2}} - \frac{25\mu^3 t^4}{576\Omega_0} - \frac{215\mu^4 t^5}{1152\sqrt{2}\Omega_0^2}, \quad \omega_3 = \frac{\mu^3 t^5}{144\sqrt{3}}$$

$$f_1 = \frac{5\mu^3 t^3}{72\Omega_0} + \frac{215\mu^4 t^4}{576\sqrt{2}\Omega_0^2} + \frac{2365\mu^5 t^5}{2304\Omega_0^3}$$

$$N = \frac{1}{\sqrt{6}} - \frac{f_1}{\sqrt{2}}, \quad f_2 = \mu N \quad (16)$$

值得注意的是:上述表达式中,似乎正好有 $f_2 = \mu N$,那么由式(9)似乎 $f_1 = 0$,但这只是精度不够导致的。注意 f_1 的最低阶是三次,故若式(9)精确到五阶,确实看不到 f_1 的贡献。前面还谈到,若认定式(10),则式(6)不成立,但其实其中仅剩的 $\Omega_1\omega_1$ 是高阶小量,精确到低阶的话,确实是零。

上述表达式(16)的有效范围可以这样判断。注意到 ω_1 的近似表达式约在 $2\Omega_0^{1/3}/\mu$ 处出现最

大值,此处可认为已偏离较大。故上述近似表达式的有效范围是 $t \ll 2\Omega_0^{1/3}/\mu$ 。

相同的泰勒展开思路可用于考查接近末态时的情况。此时可重新令末态时刻为0,然后做时间反演,让方程中各时间导数反号,而且最好用上两个第一积分(11)(12)。但由于末态(14)中 v_c 的表达式难以得到,再往高阶走表达式会更复杂,故此处从略。

5 结语

对于一般的刚体运动(非平面运动),通常会用到欧拉动力学方程或类似方程。这是非线性微分方程,通常难有解析解。此文中的四球问题就是如此。本文以此理论分析为基础,结合数值模拟和近似思想,让这个问题的结果可视化,为今后此类问题的解决提供一条行之有效的思路。通过分析不难发现,原题所给出的参考解答只在 Ω_0 特别小时才与真实情况(数值模拟)比较吻合,但是当初始角速度较大时,出入就比较大了,故原题中最好加上 Ω_0 特别小,才能让原题的参考答案更加科学。

参 考 文 献

- [1] 陈余华,黄亦斌. 一般非惯性系中的刚体动力学[J]. 物理通报, 2018, 37(6): 17-19.
CHEN Y H, HUANG Y B. Rigid body dynamics in general non-inertial reference system [J]. Physics Bulletin, 2018, 37(6): 17-19. (in Chinese)
- [2] 周衍柏. 理论力学教程[M]. 3版. 北京:高等教育出版社, 2009: 155.
- [3] 江萍, 杨华军, 蔡杨伟男, 等. 研究生光学仿真实践教学与科学探索能力培养[J]. 大学物理, 2021, 40(8): 50-56.
JIANG P, YANG H J, CAIYANG W N, et al. Teaching practice of optical simulation and ability cultivation of scientific exploration for postgraduates [J]. College Physics, 2021, 40(8): 50-56. (in Chinese)
- [4] KONG M M, GAO Z S, LI X H, et al. A generic eye model by reverse building based on Chinese population[J]. Optics Express, 2009, 17(16): 13283-13297.
- [5] 纪录片典藏. CCTV9 纪录片《天眼》[EB/OL]. https://www.bilibili.com/video/BV1cN4y1F7Mh/?spm_id_from=autoNext, 2022. 9.
- [6] 沈常宇, 李晨霞, 沈为民. 光学原理课程中“望远镜”课堂教学设计[J]. 大学物理, 2020, 39(10): 72-75.
- [7] SHEN C Y, LI C X, SHEN W M. Teaching design of telescope in the course of principles of optics[J]. College Physics, 2020, 39(10): 72-75. (in Chinese)
- [8] 新华社. “中国天眼”发现迄今宇宙最大原子气体结构 尺度比银河系大 20 倍[EB/OL]. http://www.news.cn/tech/2022-10/20/c_1129071721.htm, 2022. 10.
- [9] CHEN T, SUN J Y, DING T X, et al. Flexible wire electrode driving focus-tunable electrowetting optofluidic lens [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(10): 537-540.
- [10] HUANG Y Y, ZHAO R, MIAO W H, et al. A bifocal compound liquid lens with continuous zoom based on selective wettability[J]. Optics Letters, 2022, (47): 3824-3827.