

原子能级粒子数热布局虚拟仿真实验的设计开发与教学实践

张佳音¹ 李磊朋² 王启宇² 梁 红¹

(¹ 哈尔滨学院, 黑龙江 哈尔滨 150086; ² 哈尔滨师范大学, 黑龙江 哈尔滨 150025)

摘 要 本虚拟仿真实验探究稀土离子热耦合能级粒子数随温度的变化规律。使学生掌握温度对原子能级粒子数的影响, 并建立温度与荧光强度、荧光强度比之间的关系, 深入探究温度对荧光强度和荧光强度比影响的区别和联系, 加强对此部分理论知识的理解。进一步将理论知识进行实际应用, 利用荧光强度比测量温度。通过本实验的学习, 使学生对原子能级性质的理解更加深刻、掌握正确的荧光测试系统搭建过程, 光路调节方法以及光谱数据的计算分析方法。激发了学生的学习兴趣, 夯实了理论基础, 并能学以致用, 使学生对知识理解透彻, 获得事半功倍的教学效果, 仿真实验成绩优秀率达 81%。

关键词 虚拟仿真实验; 原子能级粒子数; 温度

DESIGN, DEVELOPMENT AND TEACHING PRACTICE OF VIRTUAL SIMULATION EXPERIMENT OF ATOMIC ENERGY LEVEL PARTICLE NUMBER THERMAL DISTRIBUTION

ZHANG Jiayin¹ LI Leipeng² WANG Qiyu³ LIANG Hong¹

(¹ Harbin University, Heilongjiang, Harbin 150086; ² Hebei University, Hebei, Baoding 071002;

³ Harbin Normal University, Heilongjiang, Harbin 150025)

Abstract This virtual simulation experiment explores the variation relationship of particle number of rare earth ion thermal coupling energy level with temperature, enables students to grasp the influence of temperature on the number of atomic energy level particles, establish the relationship between temperature and fluorescence intensity and fluorescence intensity ratio, and deeply explore the difference and relationship between the influence of temperature on fluorescence intensity and fluorescence intensity ratio to strengthen their understanding of this part of theoretical knowledge. Furthermore, the theoretical knowledge is applied in practice, and the fluorescence intensity ratio is used to measure the temperature. Through the study of this experiment, students can have a deeper understanding of the properties of atomic energy levels and master the correct construction process of fluorescence test system, optical path ad-

收稿日期: 2021-10-09; 修回日期: 2021-12-28

基金项目: 省高等教育教学改革一般项目(SJGY20210521); 黑龙江省教育科学“十四五”规划课题(GJB1422332); 哈尔滨学院教师教学发展基金项目(JFQJ2021004); 黑龙江省自然科学基金项目(LH2021F041); 全国大学生创新创业项目(202210234022)。

作者简介: 张佳音, 女, 博士, 副教授, 主要从事稀土发光研究。

通讯作者: 王启宇, 男, 硕士, 讲师, 主要从事光纤传感的研究。

引文格式: 张佳音, 李磊朋, 王启宇, 等. 原子能级粒子数热布局虚拟仿真实验的设计开发与教学实践[J]. 物理与工程, 2023, 33(1): 151-156, 171.

Cite this article: ZHANG J Y, LI L P, WANG Q Y, et al. Design, development and teaching practice of virtual simulation experiment of atomic energy level particle number thermal distribution[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(1): 151-156, 171. (in Chinese)

justment method and calculation and analysis method of spectral data. It also stimulates students' interest in learning, consolidate the theoretical foundation, and apply what they have learned, so that students have a thorough understanding of knowledge and get twice the result with half the effort. The excellent rate of simulation experiment is 81%.

Key words virtual simulation experiment; atomic energy level particle number; temperature

目前,高校开设的物理实验中,关于原子能级结构探究的实验较少。光谱是观察原子结构的重要手段^[1-3],通过光谱间接观察原子能级的跃迁规律,使学生深入掌握原子能级性质,建立荧光与原子能级辐射性质的联系,进而将荧光进行实际应用。然而,荧光测试系统价格昂贵,仪器较精细,很容易损坏,设备维护费用高。开展批量的实验教学,有一定的难度。而且荧光测试系统较难调节,调节光路、温度调节、光谱采集均需要较长时间,学时数的受限,不易开展实验教学。因此,考虑到本实验对学生知识理解、开阔视野、科学素养提升、实践能力培养的重要作用,发开原子能级粒子数热布局虚拟仿真实验具有一定的教学价值。虚拟仿真实验通过模拟真实实验仪器搭建过程和真实的实验过程,并获得高逼真度的实验结果^[4,5]。将虚拟仿真实验引入到实验教学中,可以通过以虚补实,解决了真实实验高危险、设备昂贵、实验耗时等问题。并为学生开展自主学习、探究性学习和创新性学习提供手段和资源^[6-8]。虚拟仿真实验的引入不仅有利于激发学生的学习积极性、提高学习效率,共享教育资源。同时,也可提高教师的教学效率,强化课堂教学效果^[9,10]。

原子能级粒子数热布局虚拟仿真实验课程是我校面向本科生开设的校级实验课程,共6学时。其主要任务是通过该课程的学习,使学生进一步加深对物理规律的认识和原理的理解。同时,该部分理论与科学研究的热点荧光测温问题紧密联系,开拓学生的视野。学生在实验过程中,使学生养成在善于观察、勤于思考的习惯。同时,培养学生实践能力和创新能力。

1 实验设计思路与原理

1.1 设计思路

在《原子物理》课程学习中,提到了在热平衡状态下,各个状态的原子数决定于状态的能量和温度,粒子数满足玻尔兹曼分布规律。然而,这一

规律很难被观察,本实验利用光谱观察温度对能级粒子数分布的影响,即能级粒子数热布局规律。理论上可以通过荧光强度的变化观察粒子数热布局过程。然而,荧光强度受很多外界因素的影响,如无辐射弛豫过程、能级间的能量传递过程等,所以很难通过荧光强度观察温度单一变量对粒子数分布规律的影响。本实验通过荧光光谱观察温度对能级粒子数分布的影响。然而,荧光强度很容易受到外界环境和复杂能量传递机制的影响,在实际研究中,很难通过荧光强度准确观察温度参量对粒子数布局的影响。针对这一问题,我们利用热耦能级的荧光强度比来观察粒子数热布局,热耦能级的能量间隔较小,具有相同或相似的寿命,受外界的干扰或者能量传递是相近或者相同的,那么两能级的荧光强度比可将外界的干扰排除掉,可准确的观察到温度对热耦能级粒子数分布的影响。进一步根据荧光强度比和温度的关系,可开展测量温度。

本实验在教学过程中运用了“以问题为导向的教学方法”,知识衔接紧密,由浅入深、由易到难、环环紧扣,在问题的探究中开展实验,解决困难,发现实验现象的本质。经过该实验项目的训练,学生较容易掌握光谱的测量方法、建立光谱与原子能级结构的关系、以及原子能级粒子数热布局规律。并采用了学以致用,理论联系实际的教学方法,利用荧光强度比测量温度。培养了学生的综合能力、实践能力、创新能力。

实验后,有先进客观的评价体系对学生的实验操作和实验结果进行评价。系统评价包括系统客观评价和主观评价两方面:(1)系统客观评价,根据对实验过程中交互操作的准确性和对实验操作问题的考核,系统进行评分。此外,系统中的实验数据表格的填写,考查学生对实验的理解能力和科学研究综合能力。(2)系统主观评价,主要是仿真系统中设计了教学评价和在线讨论模块,学生可以通过教学评价模块对教学过程进行打分,对教学内容进行评论,及时反馈教学内容和教

学方法中存在的问题。此外,课堂中通过在线讨论方式,借助问题导向性教学方法,开展小组讨论,对积极参与讨论的学生加分。主观评价和客观评价有机结合,既有利于学生学习成绩的综合评价,也有利于教师教学方法改进,促进教学效果的提升。

1.2 实验原理

采用 $\text{CaWO}_4:\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$ 材料中 Er^{3+} 的 $^2\text{H}_{11/2}/^4\text{S}_{3/2}$ 热耦合能级研究粒子数热布局规律。此热耦合能级是最为典型也是研究最多的一对热耦合能级,主要由于在 $\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$ 共掺杂体系中, Er^{3+} 拥有较高的上转换荧光效率,即由 $^2\text{H}_{11/2}/^4\text{S}_{3/2}$ 向基态能级 $^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁所产生的荧光较强,并且两条荧光光谱几乎没有重叠,而且该能级对之间相对较大的能级差,使得 $^2\text{H}_{11/2}/^4\text{S}_{3/2}$ 成为典型的热耦合能级^[11]。 $^2\text{H}_{11/2}/^4\text{S}_{3/2}$ 能级的布局过程见能量传递机制图(图 1(a))。在 980nm 近红外激光的激发下,吸收截面较大的 Yb^{3+} 吸收近红外光子,从基态能级 $^2\text{F}_{7/2}$ 激发到激发态能级 $^2\text{F}_{5/2}$,然后将其能量传递给 Er^{3+} 的基态能级,通过基态吸收使激发态 $^4\text{I}_{11/2}$ 被布局。处于激发态 $^4\text{I}_{11/2}$ 的粒子通过激发态吸收布局 $^4\text{F}_{7/2}$ 能级,快速地无辐射弛豫

到 $^2\text{H}_{11/2}$ 和 $^4\text{S}_{3/2}$ 能态^[12]。然后, $^2\text{H}_{11/2}$ 能级粒子向基态能级 $^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁产生 530nm 附近的荧光,对应光谱范围 510~537nm, $^4\text{S}_{3/2}$ 能级粒子向基态能级 $^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁产生 543nm 和 551nm 附近的荧光峰,对应光谱范围 537~570nm。我们利用 $^2\text{H}_{11/2}/^4\text{S}_{3/2}$ 热耦合能级向基态跃迁产生的这两个波段的荧光强度比观察这两个能级的粒子数热布局过程,并将该理论实际应用,即荧光强度比进行温度测量。

热平衡下,热耦合能级粒子数满足玻尔兹曼统计分布规律,将两个能级向基态能级跃迁所辐射的荧光强度比定义为 FIR,热耦合能级粒子数之比在数值上正比于荧光强度之比,且与温度之间应该满足

$$\text{FIR} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{h\nu_2 A_2 g_2}{h\nu_1 A_1 g_1} \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right) = B \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right) \propto \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

其中, B 为常数, $B = \frac{h\nu_2 A_2 g_2}{h\nu_1 A_1 g_1}$ 。

可通过 FIR 公式推导出温度,温度 $T = \frac{-\Delta E/k}{\ln(\text{FIR}/B)}$ 。温度 T 是 FIR 的函数,可利用能级的粒子数热布局性质(体现在 FIR 的变化)进行温度测量。

对其测温性能进行评价,通常情况下用两个指标进行评定,分别是测温绝对和相对灵敏度。测温绝对灵敏度(absolute sensitivity,记为 S_a), S_a 指的是荧光强度比值在某一给定温度处的变化的绝对大小,其定义如下

$$S_a = \frac{d(\text{FIR})}{dT} = \text{FIR} \times \frac{\Delta E}{kT^2} \quad (2)$$

其次是相对灵敏度(relative sensitivity,记为 S_r), S_r 指的是荧光强度比值在某一给定温度数值相对于本身变化的大小,其定义如下

$$S_r = \frac{d(\text{FIR})}{dT} \frac{1}{\text{FIR}} = \frac{\Delta E}{kT^2} \quad (3)$$

2 热耦合能级粒子数热布局规律的研究

2.1 实验装置

实验装置主要由样品加热装置、980nm 二极管激光器、透镜、光谱仪、光电倍增管、数据采集卡和计算机组成,如图 2 所示。热台对 $\text{CaWO}_4:$

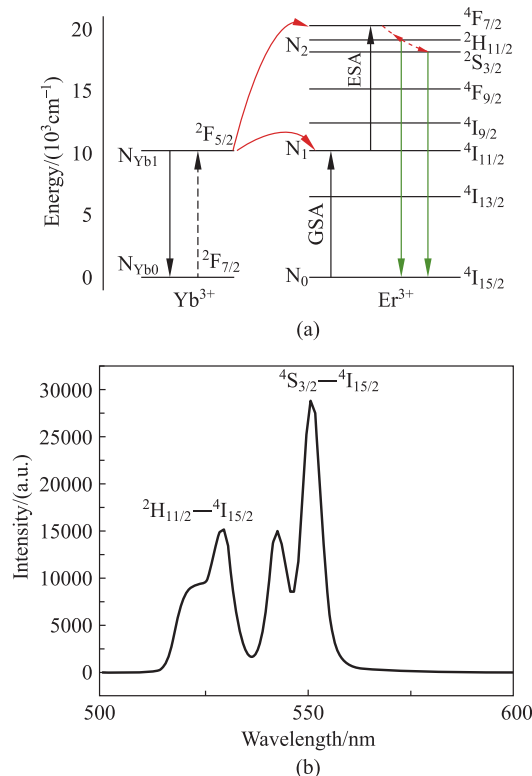


图 1 发光机制

(a) 能量传递机制; (b) Er^{3+} 离子荧光谱线

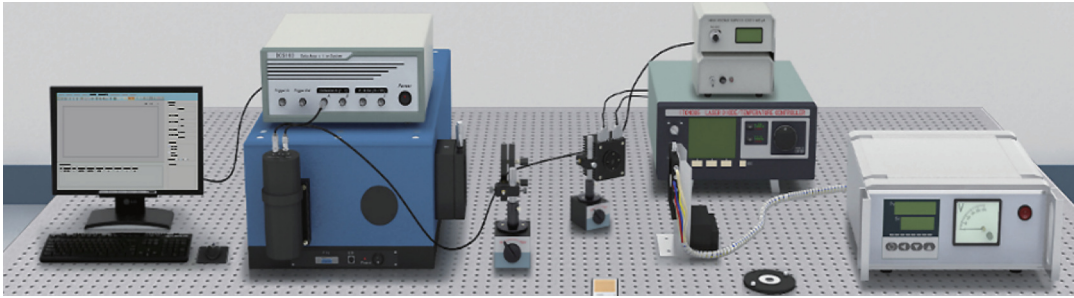
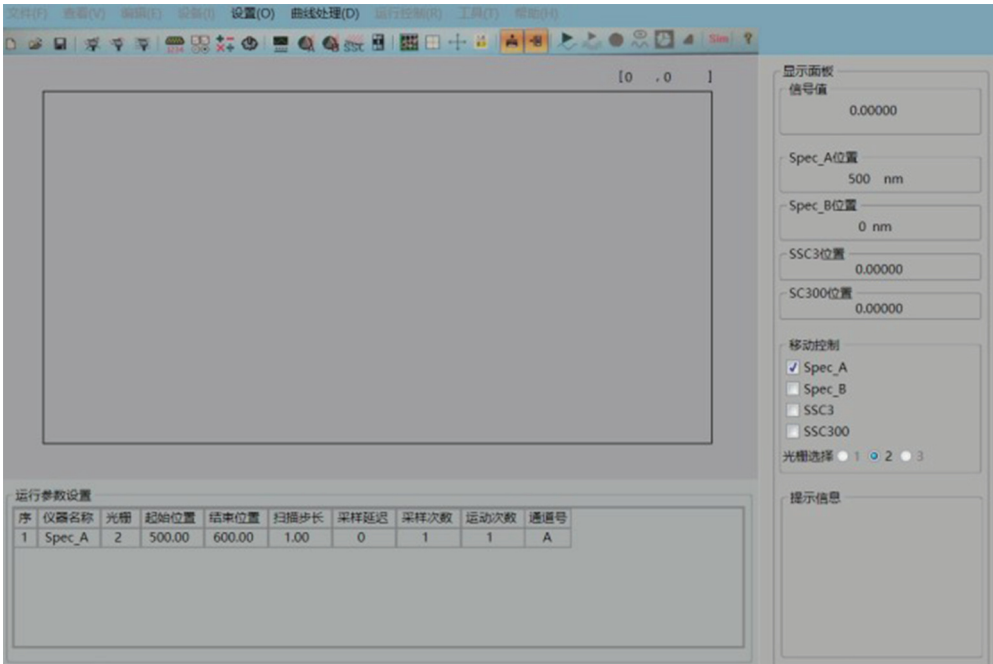


图 2 实验装置图

$\text{Yb}^{3+}\text{-Er}^{3+}$ 样品进行温度调节。980nm 激光照射到样品上,样品发射荧光,利用透镜对荧光进行调节。再利用光谱仪对荧光进行收集,通过光电倍增管将较弱的荧光信号转换成电学信号,再通过数据采集卡将模拟信号转化为数字信号,送到计算机进行处理。

2.2 仿真软件

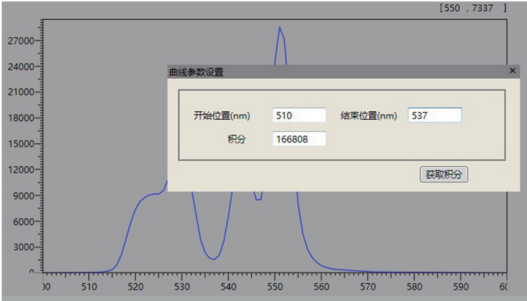
光谱测试软件界面如图 3(a)所示。设置光谱采集的运行参数后(图 3(b)),即可对光谱进行采集。利用荧光峰面积积分,计算荧光强度及荧光强度比(图 3(c))。并能根据荧光强度及荧光强度比数值,拟合荧光强度及荧光强度比随温度的变化曲线。



(a)



(b)



(c)

图 3 光谱测试软件

(a) 光谱扫描及处理软件; (b) 光谱数据采集采集参数设置; (c) 荧光强度计算

2.3 温度对荧光强度、荧光强度比的影响规律探究

在 980nm 激光激发下,测得不同温度下的 Er^{3+} 上转换荧光光谱(图 4(a))。 Er^{3+} 离子 $^2\text{H}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 以及 $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁分别产生 510—537nm 以及 537—570nm 光谱范围的上转换荧光。对这两波段荧光光谱积分,获得光谱强度 $I_{510-537\text{nm}}$ 和 $I_{537-570\text{nm}}$ (图 4(b)),以及荧光强度比 FIR 。利用荧光强度比与温度间的关系,拟合荧光强度比公式,

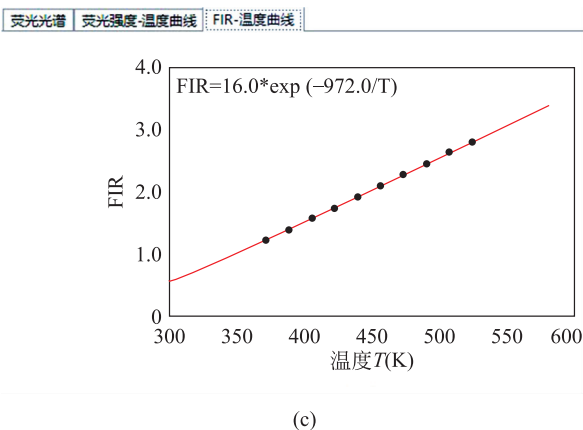
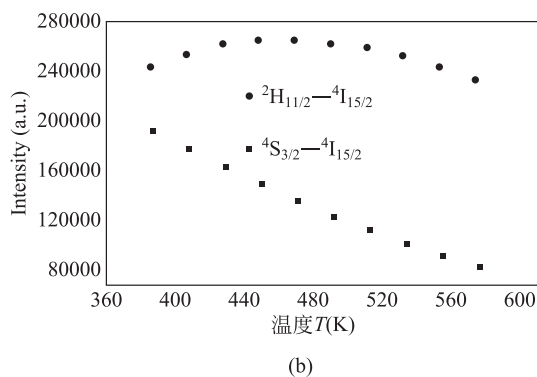
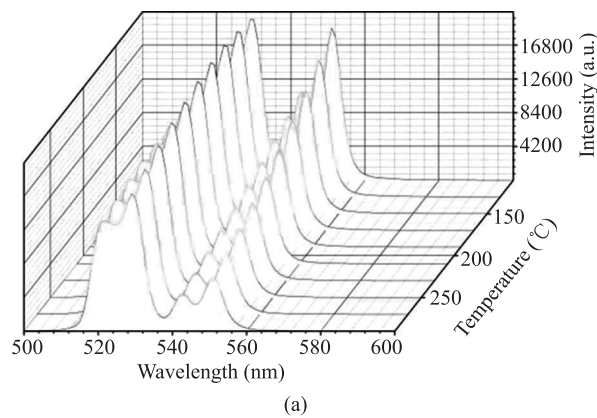


图 4 温度对光谱特性的影响

(a) 不同温度下的荧光光谱;(b) $^2\text{H}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 以及 $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁产生的上转换荧光的荧光强度随温度变化规律;(c) 荧光强度比随温度的变化规律

$\text{FIR} = 16.0 \times \exp(-972.0/T)$ (图 4(c))。可以确定 $\Delta E/k = 972$, k 为玻尔兹曼常数。经过单位换算,可以确定热耦合能级的能级间隔 ΔE 为 674.78cm^{-1} 。 ΔE 理论值为 719cm^{-1} ,与理论值非常接近。热耦合能级粒子数之比在数值上正比于荧光强度之比,根据荧光强度比可获得热耦合能级粒子数之比随温度的变化规律。

2.4 温度测量及测温灵敏度

测得室温下的荧光光谱如图 5 所示,根据荧光光谱计算荧光强度比为 0.619,再利用前面求得的银光强度比公式 $\text{FIR} = 16.0 \times \exp(-972.0/T)$,可以推导出当前的室温温度。通过计算,室温温度为 299K。室温下的测温相对灵敏度为 0.0108。

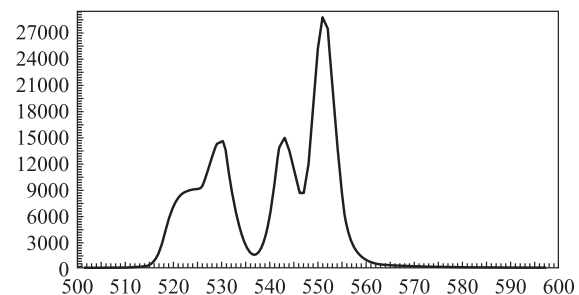


图 5 室温下荧光光谱

3 教学实践

在此基础上,我们进行了课程教学组织。具体描述为实验前准备阶段、实验阶段、实验总结阶段。

准备阶段:要求学生预习《原子物理》中原子的激发与辐射,以及原子在各能态的分布规律。理解能级间跃迁和荧光光谱间的关系;掌握粒子数与荧光强度的关系,以及能级粒子数分布规律。

实验阶段:

(教师)设置问题 A,荧光强度正比于粒子数的多少,是否可以通过荧光强度给出能级粒子数分布规律。

(学生)方案 A, a) 测量不同温度下的荧光光谱,得到荧光强度随温度的分布规律;b) 将实验得到的荧光强度随温度的变化规律与理论公式对比,发现问题,实验和理论不一致;c) 小组讨论,解释实验现象,给出不能利用荧光强度观测粒子数分布的原因。

(教师)设置问题 B,是否可以利用热耦合能级荧光强度比观察能级粒子数分布规律?

(学生)方案 B, a) 理论分析可行性,根据能级

粒子数的玻尔兹曼分布规律,推导热耦能级荧光强度公式,并建立与热耦能级粒子数分布间的关系;b) 根据不同温度下的荧光光谱,得到荧光强度比随温度的分布规律,发现与理论分析一致,可以利用荧光强度比观察热耦能级粒子数之比;c) 小组讨论,分析为什么不能用荧光强度观察粒子数的多少,但可以利用荧光强度比观察粒子数之比的多少。

(教师)设置问题 C,将理论知识进行实践应用,利用荧光强度比测量温度。

(学生)方案 C:根据建立的荧光强度比公式,确定温度和荧光强度比的关系。测量室温下的荧光强度比,对室温进行测量。并通过绝对灵敏度和相对灵敏度对测温性能进行评价。

实验总结阶段:掌握能级粒子数分布与荧光强度以及荧光强度比之间的关系;掌握影响荧光强度的主要因素;掌握能利用荧光强度比观察粒子数分布的主要原因;掌握利用荧光强度比测温的方法,以及对测温性能的评价方法。对实验原理和实验过程进行分析和总结,增强对理论知识的理解,建立正确的科学研究方法。通过实验数据表格的填写,对学生的学习情况进行检查和评价。针对学生出现的问题,着重讲解,查缺补漏,加深学生对这部分知识的理解。

加深知识理解,建立知识点的联系,形成知识网络。

教学成效:为了得到物理仿真实验教学与传统实验教学的差异,调查了本校 2018 级物理学专业学生的虚拟仿真实验成绩(图 6(a))。虚拟仿真实验成绩优秀率可达 81%,说明大多数同学都能很透彻的理解原理、掌握操作、灵活运用、举一反三,主要归因于实验内容的先进性、实验设计的合理性、教学方法的启发性和探索性,激发了学生的学习兴趣和创新性思维,培养了学生的实践能力。对比近代物理实验成绩发现(图 6(b)),虚拟仿真实验成绩明显优于近代物理实验成绩,优秀的比例更高,不及格的比例更低。说明虚拟仿真实验不仅适合学生能力提升,利用虚拟仿真可重复性还可以使基础薄弱的学生多次实验达到基本教学目标。

4 结语

通过热耦合能级的荧光光谱,探究了温度对

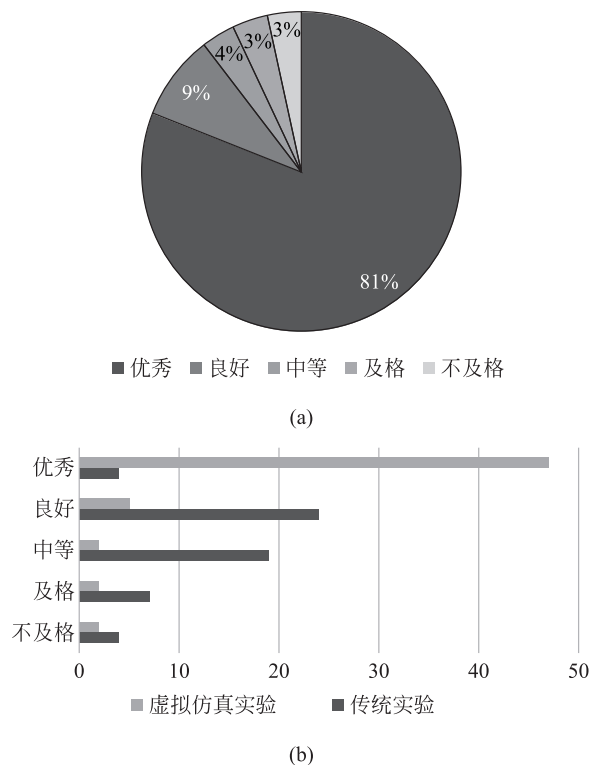


图 6
(a) 虚拟仿真实验成绩; (b) 虚拟仿真实验成绩与近代物理实验成绩对比

粒子数能级荧光强度的影响规律,进而间接分析能级粒子数的热布局规律。通过巧妙的设计,可以让学生直观的认识原子能级粒子数分布规律。在教学实践环节,采用问题引导的教学方式,使学生有明确的目标,促进学生思考,增强学生的学习兴趣,培养学生自主学习能力,加深学生对知识的理解。最后,比较了本虚拟仿真实验的实验成绩和传统实验的成绩,发现本实验成绩优秀的比例可达到 81%,说明本实验可以很好地激发学生学习兴趣,这种教学模式容易使学生理解掌握学习内容。

参 考 文 献

- [1] 郑昕,孙羽,陈娇娇,等. 氦原子 2 3S—2 3P 精密光谱研究[J]. 物理学报, 2018, 67(16):164203(1-18).
ZHENG X, SUN Y R, CHEN J J, et al. Precision spectroscopy on the 2 3S-2 3P transition of atomic helium[J]. Acta Phys. Sin., 2018, 67(16):164203(1-18). (in Chinese)
- [2] 任雅娜,杨保东,王杰,等. 铯原子 7S_{1/2} 态磁偶极超精细常数的测量[J]. 物理学报, 2016, 65(7):073103(1-6).
REN Y N, YANG B D, WANG J, et al. Measurement of the magnetic dipole hyperfine constant A_{hfs} of cesium 7S_{1/2} state[J]. Acta Phys. Sin., 2016, 65(7): 073103(1-6). (in Chinese)

(下转第 171 页)

果。观察图 10 可以发现,当水平风力作用在树梢上时,树干会发生明显的弯曲,而且越是靠近地面,树干的弯曲程度就越大,弯曲程度最大的地方恰恰就在树根处。只有树干较粗的一端朝下,才能有效抵御风力的破坏。

3 结语

综上所述,在新课标所附样题中古人运送巨木情景插图中,支架上的每一根直杆上的弯矩最大值都处于被绳索约束的交叉位置,直杆最容易在交叉位置断裂;支架中直杆较粗一端朝上,使直杆在交叉位置比较粗壮,有利于能增强支架的抗压能力。

其实,类似的很多问题在中学物理教研中之所以难以解决,是把问题强行局限在中学物理范围内所导致的;中学物理教师在探讨这类问题时,若能跳出中学物理的藩篱,在大学物理中寻求答案,一般都能得到满意的解决。

中学物理教师在教学和教研中,需要站在大

学物理的角度领悟教材和课标中的各种细节,只有做好大学物理和中学物理的衔接,熟练掌握必要的物理和数学分析工具,才能打破学段桎梏和视野局限,避免思维定势和主观臆想。

参 考 文 献

- [1] 廖伯琴. 提炼核心素养,凸显课程育人价值——义务教育物理课程标准(2022年版)解读[J]. 基础教育课程, 2022(10): 46-52.
LIAO B Q. Refine core quality and highlight the value of curriculum education—Interpretation of the physics curriculum standard for compulsory education (2022 Edition)[J]. Basic Education Curriculum, 2022(10): 46-52. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国教育部. 义务教育物理课程标准(2022年版)[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2022.
- [3] 王邵臻, 艾海英. 结构力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 35-38.
- [4] 顾艳红, 蔡晓君, 徐林林, 等. 基于 Working Model 2D 运动仿真的机构设计[J]. 实验技术与管理, 2008(2): 82-87.
GU Y H, CAI X J, XU L L, et al. Mechanism design based on Working Model 2D motion simulation[J]. Experimental Technology and Management, 2008(2): 82-87. (in Chinese)
- [5] 莫周文. 原子能级宽度及其对光谱的影响[J]. 贵州师范大学学报, 2020, 18(1): 45-47.
MO Z W. Effect of energy level width bringing to speriums[J]. Journal of Guizhou Normal University, 18(1): 45-47. (in Chinese)
- [4] 张勇, 贾洪声, 刘惠莲, 等. 示范性虚拟仿真实验教学一流课程的建设与应用[J]. 物理实验, 2021, 41(6): 41-45.
ZHANG Y, JIA H S, LIU H L, et al. Construction and application of first class courses in exemplary virtual simulation experiment teaching [J]. Physics Experimentation, 2021, 41(6): 41-45. (in Chinese)
- [5] 刘高福, 王平瑞, 吴旭普. 虚拟仿真实验在大学物理实验教学中的应用研究[J]. 物理通报, 2020, 6: 92-97.
LIU G F, WANG P R, WU X P. Research on the application of virtual simulation experiment in university physics experiment teaching[J]. Physics Bulletin, 2020, 6: 92-97. (in Chinese)
- [6] 刘斌, 刘金梅, 尹亚玲, 等. 虚拟仿真实验辅助物理实验教学功能的开发[J]. 物理实验, 2020, 40(10): 40-46.
LIU B, LIU J M, YIN Y L, et al. Research on virtual simulation experiment assisting physic experiment teaching[J]. Physics Experimentation, 2020, 40(10): 40-46. (in Chinese)
- [7] 张林. 基于计算机仿真技术的普通物理实验的教学研究[J]. 大学物理实验, 2019, 32(4): 110-112.
ZHANG L. Study of the college physics experiment teaching and learning based on computer simulation technology [J]. Physical Experiment Of College, 2019, 32(4): 110-112. (in Chinese)
- [8] 卢海军, 秦晓文. 虚拟仿真实验应用于物理教学的策略[J]. 教育与装备研究, 2020, 12: 26-28.
LU H J, QIN X W. The strategy of applying virtual simulation experiment to physics teaching[J]. Education and Equipment Research, 2020, 12: 26-28. (in Chinese)
- [9] 张金凤, 赵云飞, 范海英, 等. 虚拟仿真实验在物理实验课教学中的作用[J]. 科技创新导报, 2020, 8: 220-221.
ZHANG J F, ZHAO Y F, FAN H Y, et al. The role of virtual simulation experiment in physics experiment teaching [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2020, 8: 220-221. (in Chinese)
- [10] 吕秀品, 李林, 陈洁, 等. 大学物理实验虚拟仿真教学平台的建设与教学体会[J]. 大学物理实验, 2020, 33(4): 114-116.
LV X P, LI L, CHEN J, et al. Construction and experience of virtual simulation teaching platform for college physics experiment[J]. Physical Experiment Of College, 2020, 33(4): 114-116. (in Chinese)
- [11] 刘秀玲, 郭艳艳, 米晓云, 等. Er^{3+} 单掺、 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺杂 $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{32}\text{F}_2$ 的制备及上转换发光性质[J]. 发光学报, 2019, 40(5): 36-41.
LIU X L, GUO Y Y, MI X Y, et al. Synthesis and luminescence properties of Er^{3+} Doped and $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ Co-doped $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{32}\text{F}_2$ [J]. Chinese Journal of Luminescence, 40(5): 36-41. (in Chinese)
- [12] COPIN E B, MASSOL X, AMIEL S, et al. Novel erbium-yttria co-doped zirconia fluorescent thermal history sensor [J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(1): 1-11.

(上接第 156 页)