

文章编号:1005-4642(2021)09-0029-06

## 饱和吸收光谱实验的教学定位与教学设计

孙文博,王合英,郑盟锐,陈宜保,郭旭波,张留碗

(清华大学 物理系 北京 100084)

**摘 要:**饱和吸收光谱是冷原子物理研究领域的重要实验,是磁光阱等复杂前沿实验的技术基础,展现了量子力学原理、精密光谱技术、激光控制技术、数理实验思想等众多近代物理实验层级的教学要点. 本文详细介绍了清华大学近代物理实验课程中,饱和吸收光谱实验的教学定位、教学设计思路和课堂实践情况,并展现了该实验在层进式教学、学生认知规律研究、学生创新能力养成方面的作用和价值.

**关键词:**饱和吸收光谱;量子物理;教学设计;创新教育

**中图分类号:**G642.423

**文献标识码:**B

**DOI:**10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.09.005

以提高学生的学习成效为中心,围绕学科人才培养方案,清华大学近代物理实验课程的教学目标为“宽视野、厚基础、会实践、懂创新”. 在这一教学目标指引下,物理系在“十三五”期间建设了量子物理教学实验平台(以下简称量子平台)<sup>[1]</sup>. 饱和吸收光谱实验项目(以下简称吸收谱实验)是平台的重要组成部分,由清华大学近代物理实验室自行设计和建设完成<sup>[2]</sup>. 本文介绍了量子平台的体系构成和综合规划,将吸收谱实验置于平台整体环境中,分析其定位,详细介绍了吸收谱实验的教学设计和教学方法,并总结其与量子平台体系的协调性和与教学目标的一致性.

### 1 量子平台体系构成与吸收谱实验教学定位

教学实验项目的价值<sup>[3]</sup>主要体现在其对整个实验课程宏观体系的支撑作用,对选课学生认知阶段的适应程度,对学生未来从事科研或相关工作的启发价值<sup>[4-5]</sup>. 可见,确定吸收谱实验的定位,需要从近代物理实验课程全局进行综合思考.

清华大学近代物理实验课程共包含 6 个教学平台,涉及 43 个实验项目<sup>[6]</sup>. 量子平台作为课程中的新建教学体系,主要选择具有前沿性、典型性

的量子物理相关实验,同时在规划中注意考察其对物理学二级学科的覆盖情况、对原有实验项目体系的弥补情况和对教学目标的展现情况.

经过“十三五”期间的全力建设,量子平台现已建成 6 个教学区块,如图 1 所示. 量子平台包括:以光子纠缠源<sup>[7]</sup>为中心的量子传输第 1 教学区块,以 NV 色心实验为中心的量子计算第 2 教学区块,以扫描隧道显微镜为中心的量子探针第 3 教学区块,以磁光阱实验为中心的冷原子第 4 教学区块,以及平展型共振类实验第 5 教学区块和测试类实验第 6 教学区块. 吸收谱实验项目即为第 4 教学区块的组成部分.

在教学实践中,以学生认知规律为出发点,量子平台设计了层进式教学体系,如图 2 所示. 第 1 层级是以通识教育为锚点的基础型实验项目,强调规范、素养培养;第 2 层级是以通专结合为锚点的导引型实验项目,强调兴趣激发、能力养成;第 3 层级是以专业实验能力培养为锚点的进阶型实验项目,强调学科交叉,注重创新能力展示. 吸收谱实验项目位于第 2 层级,是典型的导引型实验项目.

在量子平台体系中,导引型实验项目须具备承前启后的作用,如图 3 所示.

“第 11 届全国高等学校物理实验教学研讨会”论文

收稿日期:2021-07-09

基金项目:教育部拔尖计划 2.0 研究课题资助(No. 20211007);清华大学实验室创新基金资助(No. 53100700120,53100700121)

作者简介:孙文博(1980-),男,辽宁锦州人,清华大学物理系工程师,硕士,从事近代物理实验教学.  
E-mail:swb@tsinghua.edu.cn



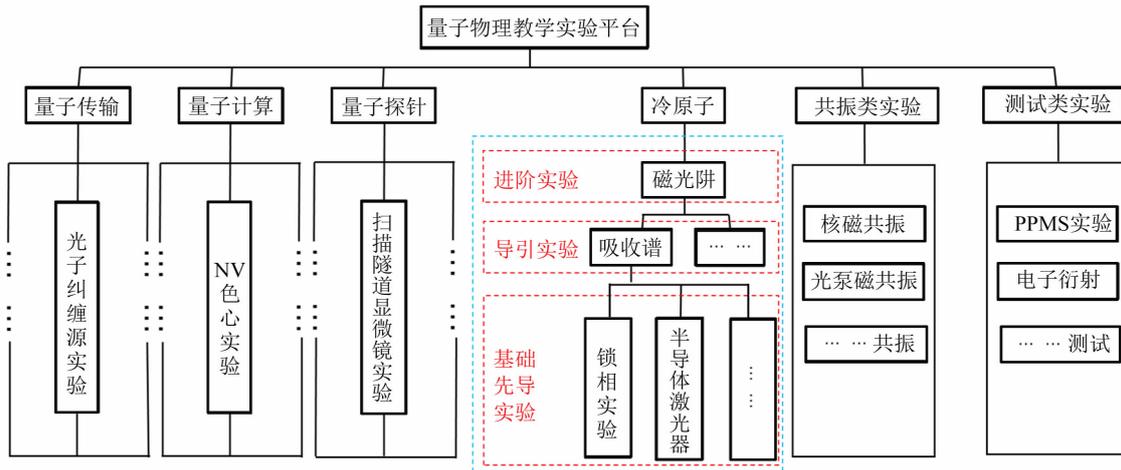


图 1 量子物理教学平台实验区块分布图

“承前”指让学生明确感知在对应的基础型实验项目中所学知识、所练技能、所得思想如何运用。如吸收谱实验作为引导型实验，将示波器使用、电信号传输、光谱观测、半导体激光器、锁相放大器、激光全息作为自身的基础型实验。在教学设计中，吸收谱实验须全面应用并合理展现基础先导实验的教学成果。“启后”指让引导型实验成为进阶型实验的组成部分，使学生减少对进阶型实验的陌生感，减少对复杂实验系统的恐惧感，增强对复杂体系细节的把控能力，增加自主思考和自由发挥的空间。借此降低学生因无的放矢、盲目尝试导致实验失败而挫伤好奇心，从而呵护学生的实验志趣和创新意识。吸收谱实验以磁光阱实验为进阶型核心实验项目。在教学设计中，为

适应磁光阱实验的需要，吸收谱实验须在谱分析、PDH与锁频技术、光学综合构建能力等方面开展教学，设计学习成效评估方案，发挥对磁光阱实验教学开展的支撑作用。

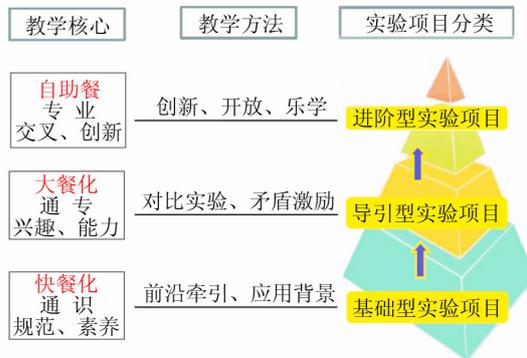


图 2 量子平台教学层级划分图

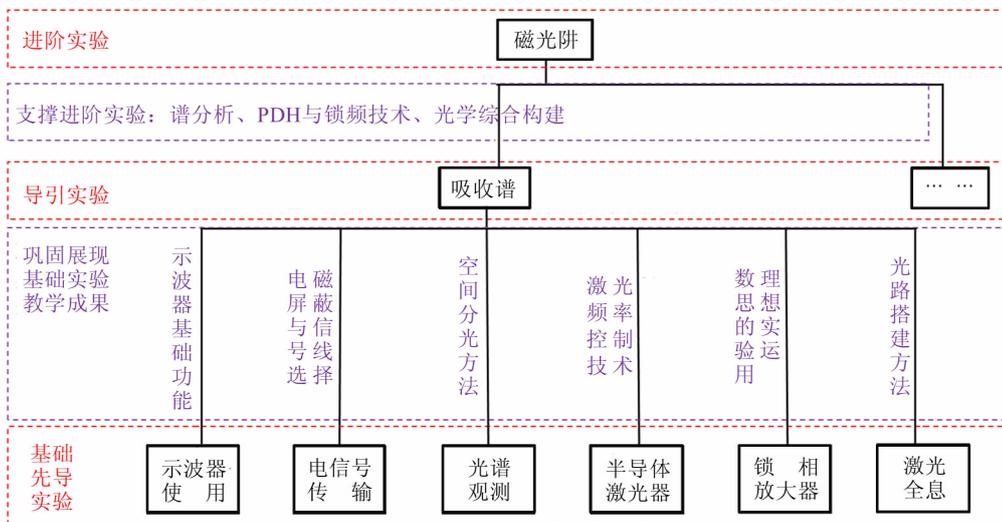


图 3 吸收谱实验作用示意图

## 2 吸收谱实验教学设计与课堂实践

吸收谱实验的教学设计思想为:先让学生练习相关基础型实验的所学所得,再进一步提出导引型教学要求.综合多项导引型教学要求,指导学生完成实验学习,最后现场评分,告知学生学习成效及显著不足,鼓励学生深研、深思.

为介绍教学设计和课堂实践的具体情况,本节内容将涉及吸收谱实验的具体细节,图 4 为吸收谱实验装置照片.吸收谱项目的原理、实验步骤、结果分析等内容,请参阅文献[2].

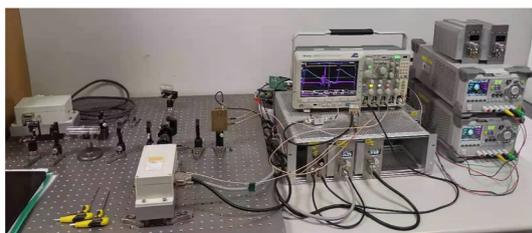


图 4 吸收谱实验装置照片

### 2.1 得双谱:基础型与导引型实验对接

如图 5 所示,双谱包含饱和和吸收光谱(图中蓝线)和 PDH 谱(图中紫线).PDH 谱教学步骤的设计,与吸收谱实验后续的进阶型实验磁光阱的需求相关.

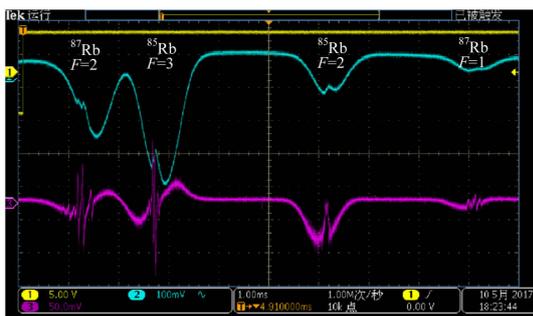


图 5 吸收谱实验中的双谱示波器图样

在先导的光谱观测基础实验中,学生学习了直接用光谱仪对被测试光束进行空间色散分离,实践了光谱观察方法.吸收谱实验与此不同,通过泵浦激光进行频率扫描的方式,让 Rb 原子气室产生的特征光谱以时间色散分离的方式呈现.采用相同观测目标、不同观测方案,有利于学生拓展眼界,开阔思路,鼓励其在未来的实验工作中不拘泥于现成方案,独立思考、因地制宜开展设计.

在先导的半导体激光器基础实验中,学生了

解了温度和电流对输出光束的影响.吸收谱实验将对学生这一认知进行强化,同时设计双变量输出控制观察的教学步骤.图 6 为自行设计和制作的温控器和激光直流控制器,温度精度为 1 mK,电流精度为 10  $\mu$ A.课堂上,教师要求学生在看到饱和和吸收光谱后,以 1 mK 步长改变温度,同时配合激光直流供电微调,以保证观察到的吸收谱在示波器上不发生位移.学生学习以激光管温度-电流曲线描述激光输出情况,在理解激光输出控制方法的同时,直观理解温漂概念.



图 6 温控器与激光直流控制器

在先导的锁相基础实验中,学生学习到锁相的数学思维方式,即将参考信号与调制过的被测信号混频,再通过数学展开观察特殊频率项,应用技术手段提取待测信号.在吸收谱实验中,设计 PDH 谱的教学步骤,可加强学生对锁相技术思想的理解.如图 7 所示,通过高频信号发生器产生小振幅、高频率的正弦波参考信号,由 minicircuits 的商用电路模块 mixer 将被参考信号调制过的待测信号与参考信号再次混频.以贝塞尔函数为基础,经过数学展开和高阶小量处理,得到待

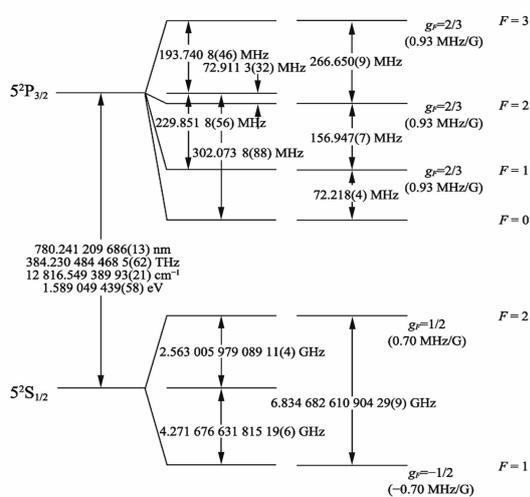


图 7 参考信号发生器和混频器

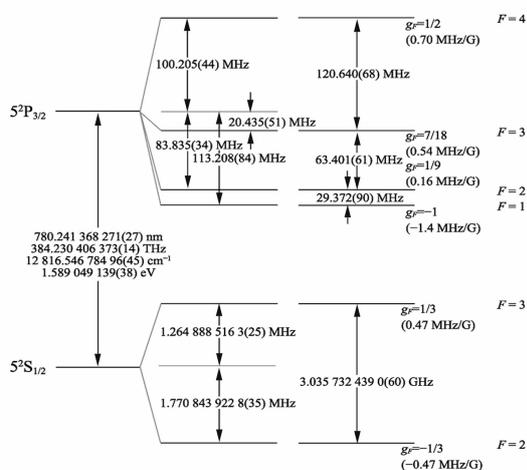
测信号表达式,经过低通滤波,获取待测信号.这一设计,不仅让学生深入理解数学处理思想在信号提取领域的应用,也向学生展现了数学手段的实验实现方式,对学生未来综合运用数理思想自行构建实验系统有直接帮助.

## 2.2 识双谱:理论与实验对照能力训练

学生在原子分子物理课程中学习过 Rb 的同位素能级谱线如图 8 所示.在吸收谱实验中,要求学生对照图 8 中可能发生的跃迁进行分析,并计算能量,制作表格.对照实验中示波器采集到的双谱,逐一指认峰(吸收谱上)或过零点(PDH 谱上)对应表中的跃迁情况.通过这一定性分析,加深理论课所学的能级谱与实验课所见的光谱的对照认知.



(a)  $^{87}\text{Rb}$



(b)  $^{85}\text{Rb}$

图 8 Rb 的能级谱图

为了训练学生精致实验的习惯,设计了扫频方案尝试这一教学步骤.首先让学生思考控制激光扫频的方式,分析温控或流控的优缺点.再以流控为基础,引导学生分析和试验控制波形的选择,最终采用了锯齿波.

为了培养学生理解数据和挖掘信息的能力,设计了定标这一教学步骤.示波器上显示的图形以时间为横轴,而原理中,扫频过程是以电流激励值为横轴,这导致学生往往理不清二者之间的关系.教师引导学生在定性识谱的基础上,选择出吸收谱上 2 个特征峰(或 PDH 谱上过零值),如图 5 所示.通过理论计算得到其间的跃迁能量,进而得出对应光频率.用这样的方法将示波器时间横轴定标为扫频光的频率横轴,才能应用示波器采集到的实验数据计算激发态寿命、原子气体温度等.

## 2.3 识仪器:授之以渔,高级实验仪器训练

教学中,教师经常听到学生说:这个仪器我以前没用过,我以前用的这种仪器长得和这台不一样.学生的表述和茫然的眼神告诉教师应该在课堂上教会学生如何应对“陌生”仪器.

仪器使用的教学贯穿清华大学近代物理实验的整个体系,因课时所限,吸收谱实验着重做了如下 2 点教学引导:

1)对高级示波器的使用引导.为实现这一教学设计,专门选用了泰克 MDO3104 示波器,如图 9 所示.与基础先导实验中所用的示波器相比,这台示波器更加复杂,内嵌了数学计算、屏幕测量、数据存读、波形处理等多项升级功能.学生面对这样的示波器往往无从下手.在课堂教学中,教师引导学生回顾先导实验示波器的基础功能,并要求学生通过 MDO3104 示波器的面板功能键名称,思考其基本功能的操作方法.之后,指引学生使用“Acquire”功能按钮及下拉菜单,探索波形



图 9 泰克 MDO3104 示波器的前面板

平均等方面的功能和操作,以及使用“Save”功能按钮及下拉菜单探索数据保存和读入方面的功能和操作。最后提供说明书,供有兴趣的学生全面了解这种高级但科研实验室常用的示波器。这一步骤的设计,旨在培养学生面对功能相近而外观却不同的仪器设备时,能够快速有效开展仪器使用的能力。

2)对学生以往从未见过的组合仪器体系的使用引导。课堂上,以温控器、激光直流电源、激光扫描驱动器、激光器这一组合体系为例开展教学。要求学生判断各仪器相互连接方式,并用电缆线加以连接,训练并考察学生对组合仪器端口的识别能力、传输控制逻辑的分析能力。在开机之前,要求学生思考实验指导书中的开机顺序,哪些是必须严格执行的,哪些是可以颠倒顺序的,借此引导学生对实验操作做到“知其然,知其所以然”。例如,温控必须先于电流激励设备开启,否则,轻则温度不稳,数据不可用,重则温控机制缺失,设备过热烧毁等。

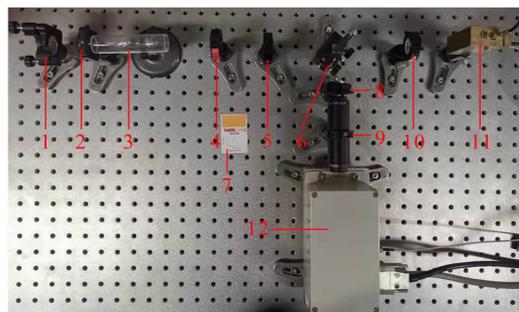
#### 2.4 识组合:功能模块构建与组合应用训练

在教学中,教师发现学生对体系的认知过于简单。例如,面对光路,学生习惯于从左到右或从上到下的简单理解顺序。在课堂上,训练学生从实验目的和核心原理出发,首先寻找核心元件,再加入拓展功能部件,从而完善光路。如图10所示,学生要思考的核心实验目标是扫频激光作用于Rb原子气室,产生饱和吸收光谱,接收并分析光谱。所以学生应该最先寻找激光器、原子气室、探测器。而后进行思维风暴,完善光路。比如照射在气室上的光截面积要尽量大,以实现更多原子参与饱和吸收过程,所以要有扩束准直;为研究饱和展宽等因素的影响,需要控制照射气室的激光强度,所以要有光强控制器件;为实现激光器保护,应该设置光束隔离器;为实现光路合理走向,要加入光路走向控制部件。

在实验器材和元件的选择上,只要满足上述设计需求,就可以应用模块组合思想,采取多种方案进行实验。运用这样的教学指引,训练学生宏观把握实验全局的能力和对比不同技术细节的能力,并具有激励学生技术细节创新的作用。

实验中采用的组合模块包括:核心原理模块(激光器、气室、探测器)、光截面积控制模块(凹透镜和凸透镜)、激光强度控制模块(半波片、偏振分

束器、可调衰减器)、激光器保护模块(激光器、光隔离器)、走向控制模块(反射镜、1/4波片、偏振分束器)等。同时也提供比标准实验方案更多的元件,鼓励学生设计方案细节。对比教师提供的功能模块和图10中单个元件的空间位置,可以发现,教师提供的模块仅以功能和逻辑为纽带,并无位置远近关系,希望借此引导学生构建逻辑实验体系,打破空间走向思维定势。



1. 反射镜(可替换为可调衰减器) 2. 1/4波片 3. Rb原子气室 4. 准直透镜 5. 扩束透镜 6. 偏振分束器 7. 红外观察片 8. 半波片 9. 光隔离器 10. 聚焦透镜 11. 光接收器 12. 激光器

图10 吸收谱实验光路元件图

#### 2.5 教学顺序安排

教学顺序安排主要考虑学生对陌生事物的认知规律和难易内容出现的顺序对学生心理的影响情况。

1)实验前,由学生或教师搭建好整套系统,达到可以观察吸收谱全貌的程度,学生的学习起点是“识双谱”。这样做的好处在于,避免学生因对谱线形貌缺乏认知,在后续实验环节中,不知该向何调节方向努力。

2)研究系统,尤其是电子学部分的功能和器件相互连接关系,完成“识仪器”。这样做的好处在于,通过对复杂仪器和控制体系的认知,提高学生宏观把握实验全局的意识。

3)拆除原光路,学生自行搭建光路,重现吸收谱。这样做的好处是有助于培养学生的创新思维能力。此步骤的安排,目的在于确保学生在探索和创新过程中不会因缺乏谱的直观认知而不知所措,也不会因为仪器使用不当而误判方案的可行程度。

4)深入思考吸收谱和PDH谱的获得方法,完成“得双谱”学习。此步骤放在最后,主要考虑

到学生在实验之初无法全面认知先导实验与吸收谱实验的关联,尤其是锁相先导实验展现的数理思想在吸收谱实验中应用的深层次关系.实践证明,此步骤放在最后,有助于学生全面理解实验设计思想,同时作为教学实验的一个高潮,对激励学生学习兴趣有显著作用.

### 3 吸收谱实验中其他教学要点的体现方法

在因材施教思想的指引下,除了以上系统的教学设计外,课堂上,教师还因人而异安排了其他教学环节,包括:

- a. 展现选题价值的实验背景、科研前沿情况、产业需求情况的讲解;
- b. 培养科学作风的 PPT 汇报要求、实验报告文献引用规范、学术不端判定规则的讲解;
- c. 拓宽学生的学科视野、激励学习兴趣的邀请报告环节.

### 4 结束语

吸收谱教学实验项目的作用和价值,主要取决于其在课程实验项目体系中的定位,对课程教学目标的展现程度,与课程及量子平台内其他实验项目的协同育人功能.基于以上几点,本文从所属课程背景、所处教学定位、所设教学方案等角

度,对吸收谱实验项目的教学设计进行了详细的介绍.希望通过这些介绍,能够向教学同行展示我们的工作思路和工作成果,以获得深入交流和得到指导的机会.

### 参考文献:

- [1] 孙文博,王合英,张慧云,等.量子物理教学实验平台建设与成效——清华近代物理实验课程“十三五”期间教学改革实践[J].实验技术与管理,2021,38(4):165-170.
- [2] 孙文博,张慧云,郑盟锴,等.Rb原子饱和吸收光谱实验教学系统[J].实验技术与管理,2020,37(8):154-161,194.
- [3] 林健.新工科专业课程体系改革和课程建设[J].高等工程教育研究,2020(1):1-13,24.
- [4] 吴思诚.抓住机遇,深化改革,充分发挥实验物理教学在培养新型人才中的重要作用[J].物理实验,1999,19(6):3-5.
- [5] 孙腊珍,孙金华.近代物理实验教学改革与实践[J].物理实验,2005,25(5):31-32,41.
- [6] 葛惟昆,王合英.近代物理实验[M].北京:清华大学出版社,2020:I-II.
- [7] 孙文博,王合英.I类和II类光子偏振纠缠源的实验教学对比研究[J].实验技术与管理,2016,33(11):75-79,93.

## Teaching orientation and design of saturated absorption spectrum experiment

SUN Wen-bo, WANG He-ying, ZHENG Meng-kun,

CHEN Yi-bao, GUO Xu-bo, ZHANG Liu-wan

(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Saturated absorption spectrum is an important experiment in the field of cold atomic physics, which is the basis of magneto-optical trap experiment. Combined with the saturated absorption spectrum experiment, the teaching points of modern physics experiments were showed dearly, such as principle of quantum mechanics, precision spectrum technology, laser control technology, mathematical thought of physical experiment, etc. In this paper, the teaching orientation, teaching design ideas and classroom practice of the saturated absorption spectrum experiment in the modern physics experiment course of Tsinghua University were introduced in detail. The teaching effect and value in level-advancing teaching, study of students' cognitive law and cultivation of students' innovation ability were demonstrated in this experiment.

**Key words:** saturated absorption spectrum; quantum physics; teaching design; innovation education

[责任编辑:任德香]