

## 基于深度学习的有机合成化学课程思政教学设计 ——以“自由基反应及其应用”为例

张鸽\*, 任敏, 汪越

东北师范大学化学学院, 长春 130024

**摘要:** 有机合成化学是高校化学类本科生的一门专业选修课。自由基化学是有机化学学科中非常前沿的研究领域。针对当前学生在基础有机化学中自由基化学知识构建缺失的现状, 提出以“立德树人”的课程思政为指引, 以“深度学习”为目标, 以“科学前沿”的中国自信为背景的互动教学, 在合成化学课程中设计自由基反应相关知识模块, 从自由基的引入、深化、拓展及不对称自由基反应的应用等多方面深度学习, 凝练合成化学课程思政元素, 建构思政案例库, 为本科阶段有机合成化学教学与课程思政相结合提供新的视角。

**关键词:** 有机合成化学; 自由基反应; 课程思政; 深度学习; 教学创新

**中图分类号:** G64; O6

## Ideological and Political Education Design in Organic Synthesis Chemistry Course Based on Deep Learning: A Case Study of “Radical Reactions and Their Applications”

Ge Zhang\*, Min Ren, Yue Wang

Department of Chemistry, Northeast Normal University, Changchun 130024, China.

**Abstract:** Organic synthetic chemistry is an elective course for undergraduate chemistry majors at universities. Radical chemistry represents a cutting-edge area of research field within organic chemistry. Addressing the current gap in students' understanding of radical chemistry concepts in foundational organic chemistry, this study proposes an interactive teaching approach guided by a “moral education” framework, aiming for “deep learning”, and taking “scientific frontiers” as a backdrop for cultivating national confidence. The course design encompasses a knowledge module on radical reactions, facilitating in-depth exploration through various aspects, including the introduction, development, and expansion of radical concepts, as well as the application of catalytic asymmetric radical reactions. This approach aims to integrate ideological and political elements into the organic synthesis curriculum, establish a repository of case studies for ideological education, and offer a novel perspective on the integration of organic synthesis teaching with ideological and political education for undergraduate students.

**Key Words:** Organic synthesis chemistry; Radical reaction; Curriculum ideological and political education; Deep learning; Teaching innovation

### 1 引言

课程思政是落实立德树人根本任务的关键课程。习近平总书记在学校思想政治工作会议强调:

收稿: 2024-04-15; 录用: 2024-05-30; 网络发表: 2024-07-29

\*通讯作者, Email: zhangg492@nenu.edu.cn

基金资助: 国家自然科学基金(22171043)

“在大中小学循序渐进、螺旋上升地开设思政课非常必要，是培养一代又一代社会主义建设者和接班人的重要保障<sup>[1]</sup>。”大学化学课程思政内容的开发可以从生活中的化学、物质/方法的发展历史、合成化学科学前沿、产业应用、新闻案例等方面挖掘元素，在培养学生知识与能力的基础上，增加政治认同、家国情怀、道德修养、文化素养等思想，融入实事求是的科研态度、严谨规范的不懈追求、报效祖国的社会责任感等情感态度，其教育教学工作对高校的化学学科教学、科研素养培养、高阶思维能力提升等各个方面都起着至关重要的作用。

有机合成化学一直是发现和创造新物质的重要科学，也是国内各大高校化学类本科生的专业选修课，属于高阶课程。有机合成化学课程的教学内容包括合成化学的基本概念，基本理论，基本反应、机理，有机合成在相关领域研究中的应用等，在学生的专业知识与技能构建、联系理论与实践方面发挥着重要作用<sup>[2]</sup>。自由基反应是有机化学反应中一个基本反应类型，也是合成化学的一个非常有用的策略，涉及活泼的有机自由基中间体，与常见的极性中间体(如碳正离子和碳负离子)参与的反应有着本质的区别，是当前有机化学科学前沿研究的重要方向之一。近年来，随着过渡金属催化的有机反应不断发展，过渡金属催化的自由基反应也取得了迅猛发展，尤其是极具挑战性的自由基反应的立体化学控制问题也被不断攻破，高立体选择性的自由基加成反应、自由基取代反应不断被报道。有机化学本科课程教学内容中涉及一些自由基反应相关内容，例如烷烃章节中 $C(sp^3)-H$ 键的卤化反应、烯烃章节中烯烃在过氧化物条件下与 $HBr$ 加成反应等。但是在过去传统教学中，由于基础有机化学课时短，教师基本上都偏重于各类有机化合物的性质和经典的离子型反应(如亲电、亲核反应)的讲解，对自由基反应相关知识的介绍相对比较浅显，如蜻蜓点水般；同时，学生在学习的过程中也常是记忆式，在相应的考试或其他需要用到时采用生搬硬套、依葫芦画瓢的方式，达不到对所学知识点的深度融合和灵活运用。

针对这一问题，本文将有机化学学习中零散的自由基反应结合起来，并以此为基础搭建新知识框架，在合成化学学习中单独设计“自由基反应及其应用”这一模块作为教学设计案例。以“立德树人”的课程思政为指引，以“深度学习”为目标<sup>[3-5]</sup>，以“科学前沿”的中国自信为背景，以“学生为本”的教育理念为手段，融入课程思政，结合人工智能等新型现代教学手段<sup>[6]</sup>，采用线上-线下混合式的课堂互动教学形式，分别从自由基的引入、自由基反应的深化、自由基反应的拓展、自由基反应的应用等四个方面带领学生深度学习、了解自由基及其应用，帮助学生形成融合视域，打破知识壁垒，培养学生能力的同时提高学生的化学综合素养。

## 2 基于深度学习的有机自由基反应思政教学设计案例

### 2.1 教学目标设计

(1) 掌握自由基的结构与性质、自由基的产生，实现对自由基反应由模糊零散到系统分析思考的进阶。

(2) 了解手性分子的重要性，知道获得对映体纯手性分子的方式，体会通过合成的方法获得对映纯手性分子的重要性。

(3) 了解科学前沿中基于自由基中间体实现立体化学控制的不对称自由基反应的最新研究成果，树立持之以恒、迎难而上的科研态度，培养热爱祖国、报效国家的情怀。

(4) 培养严谨诚信的学习态度和团结合作精神、关心社会和产业发展的责任感，坚定科技报国的职业信念。

### 2.2 思政案例设计

如表1所示，本节课根据自由基反应及其应用设计了丰富、多元化的课程思政案例，包括生命体的自由基反应、“反应停”事件、我国学者在不对称自由基反应领域的创新成果等。通过思政案例，融入合作式自学、案例式教学、讨论式研学等方式，将课程思政与专业知识相融合，加强对专业知识传授的同时培养学生严谨、坚韧的科研信念，深化报效祖国的科学精神，达到思政与专业课程协同育人的教学目标。

表1 自由基化学教学的思政案例

融入过程	思政案例	思政分析
前置任务	自由基发展史 典型金属铜/钴/铁催化自由基反应	曲折探索中推动社会进步 科学工作者的责任和担当
教学导入	自然界中的自由基反应 自由基反应的应用	自由基化学与生命化学、材料化学、环境化学等的交叉 推动社会高质量发展的追求
知识讲授	中国自由基化学奠基人刘有成教授的奋斗史 不对称合成——“反应停”事件 不对称的自由基反应 我国学者在不对称自由基反应领域的创新成果	家国情怀与奋斗人生 药物研发的严谨、规范 勇攀高峰、不懈探索 “做有特色的化学”、引领国家发展的理想信念

## 2.3 教学导入

教学导入部分包含理论知识和思政案例，二者同向同行、相互融合。具体课程开始先以生命体中的自由基反应为切入点，通过介绍自由基化学在生物、有机发光材料、燃烧、大气等方面的应用引出自由基——含有未成对电子的物种。随后，通过学生课前预习的有关自由基化学的发展历史，结合课堂展示自由基的结构特征，引导学生总结自由基反应的类型、分析自由基反应立体化学控制的难点；期间穿插讲授中国科学院院士、中国科学技术大学刘有成先生的家国情怀和奋斗人生，作为我国自由基化学奠基人，其科研生涯充分体现了科学探索精神和对国家科技进步的深刻贡献<sup>[7]</sup>。刘院士的主要研究领域为有机合成方法学，他在兰州大学创建了中国第一个自由基化学研究小组，并在中国最早开展了有机半导体的研究工作，极大推动了中国自由基化学的发展。他的工作不仅在学术上得到国际认可，更对我国的合成化学和材料科学产生了深远影响。为了能更好地体现刘院士的科学精神，课程中特别设计了关于他科研工作的案例学习模块<sup>[8,9]</sup>。学生将通过分析他的研究论文和项目，学习如何将科学研究与实际应用结合，培养解决实际问题的能力和科研的严谨态度。此外，我们还将刘院士的奋斗人生和家国情怀融入到课堂讨论中，让学生能够从中学习到如何将个人研究与国家需求和社会责任相结合<sup>[10,11]</sup>。最后，通过“反应停”案例引导学生思考并体会手性的重要和不对称催化合成的意义，并通过介绍学科前沿中我国研究学者在不对称自由基反应中取得的研究成果，深化对自由基反应在不对称合成中的应用。利用趣味的课程导入引入知识的同时激发学生对专业的兴趣和热情，同时融入丰富的学习素材，帮助学生深入理解并总结自由基化学的相关知识，提高专业使命感，以饱满的热情投入课程学习，以及在今后的学习工作中树立不畏艰辛、执着追求的精神。

## 2.4 教学设计

### 2.4.1 自由基的结构与性质

自由基是含有未成对电子的原子或原子团，是有机反应中一类非常重要的反应中间体。含有未成对单电子的这一结构特点使其化学反应性质明显区别于碳正离子、碳负离子等常见中间体，主要体现在：

(1) 自由基反应拥有更广泛的官能团兼容性，酸或碱的存在以及溶剂极性的改变通常不会对其产生太大干扰，例如许多自由基反应可以在含水介质中进行，这是一般离子型反应难以比拟的。

(2) 由于未成对电子的存在，自由基具有高反应活性，许多常规离子型反应难以实现的化学转化如惰性 $sp^3$ 碳氢键的官能团化、大位阻季碳中心的构建等，通过自由基反应可以顺利进行，可大幅提升反应效率。

(3) 自由基的产生方式具有多样性的特点，如有机化合物的单电子氧化或还原、弱共价键的均裂等均可产生自由基物种。因此，自由基反应的底物可以多种多样，给自由基反应的应用提供了十分有利的条件。

(4) 当自由基与其他分子碰撞时，它们倾向于以一种使未配对的电子配对的方式发生反应，所以最直接的一种方法是从另一个分子中攫取一个原子。

(5) 自由基是一类平面型中间体，可以通过催化剂中配体的设计或弱相互作用等来使得反应过程平面空间具有差异性，这就为自由基中间体的不对称合成提供了先决条件。

#### 2.4.2 自由基的产生及经典的自由基反应

自由基是高活性中间体，具有高反应活性的重要原因是自由基不满足八电子稳定结构，即具有一个未成对的电子。引导学生从化学键的形成与断裂以及原子稳定性的角度学习、总结自由基的产生方式和反应类型。图1列出了几种常见的自由基的产生方式，主要包括：1) 利用中性的含有弱 $\sigma$ 化学键的有机化合物如过氧化物( $\text{RO}-\text{OR}$ )、卤素单质等，在光诱导或加热条件下通过弱 $\sigma$ 键均裂产生自由基物种；2) 利用中性分子通过单电子转移(失去或得到一个电子)产生自由基物种。这种方式在羰基类化合物中比较常见；3) 利用已产生的自由基如卤原子( $\text{Cl}\cdot$ 、 $\text{Br}\cdot$ )通过攫取中性分子中的原子/基团，再生一个新的自由基；4) 通过优先产生的自由基物种对不饱和 $\text{C}=\text{C}$ 键加成产生新的烷基碳自由基，即经典的自由基加成；5) 一个复杂的自由基物种通过消除或化学键的均裂脱除一个稳定的中性分子产生自由基，例如偶氮二异丁腈类化合物。

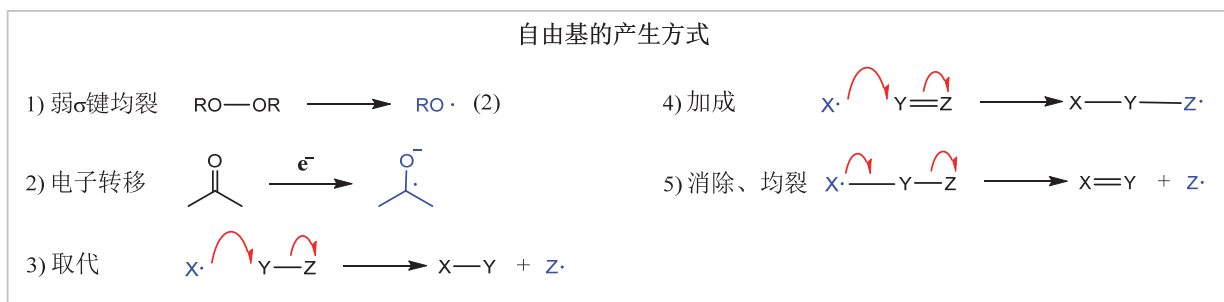


图1 自由基的产生方式

基于上述对自由基产生方式的学习，结合教材，教师引导拓展、总结自由基引发剂的种类、特点以及所引发自由基反应的机制，重点介绍当前主流的自由基引发剂，如叔丁基过氧化氢(Tert-butyl Hydroperoxide, TBHP)、偶氮二异丁腈(AIBN)，以及原子转移自由基聚合(ATRP)引发剂引发的自由基反应过程。学生在此基础上自主总结基础有机化学中经典的两类自由基反应——烷烃 $\text{C}-\text{H}$ 键的官能化和烯烃的自由基加成反应及其机制。如图2所示，烷烃和烯烃的自由基反应都需要经过链引发、链增长和链终止三个过程。链引发是形成单体活性自由基的一个基元反应；链增长是在第一步形成的单体活性自由基的基础上，再引发单体逐渐形成长链自由基的反应；链终止则是长链自由基与单体活性自由基反应或发生自偶联相互作用，使活性链消失，最终反应链终止的过程。对于烷烃类化合物，利用已产生的高活性自由基如卤原子( $\text{Cl}\cdot$ 、 $\text{Br}\cdot$ )攫取饱和烷烃 $\text{C}-\text{H}$ 键的氢原子，可以实现脂肪烃 $\text{C}-\text{H}$ 键的活化。对于烯烃类化合物，通过第一步自由基对不饱和 $\text{C}=\text{C}$ 键加成产生新的烷基碳自由基进而被另一物种捕获，可以实现烯烃的双官能团化反应。在此，可以继续引入原子转移自由基加成反应在烯烃聚合方面的重要应用。

化学学科的发展进步日新月异，我们在课程学习中同时引入当前自由基化学领域的前沿研究内容。从“深度学习”的理念出发，探讨当前自由基化学的前沿研究课题，包括过渡金属催化的自由基反应、光化学以及电化学介导的有机自由基反应等。重点介绍我国学者如华中师范大学肖文精教授课题组<sup>[12]</sup>、中国科学院上海有机研究所李朝忠研究员<sup>[13]</sup>等在自由基反应发展的贡献。通过对当前自由基化学前沿知识的学习，建立立体化的知识网络，达到触类旁通、迁移运用、利用已有知识推导解决问题的目的，全面提升综合素养。

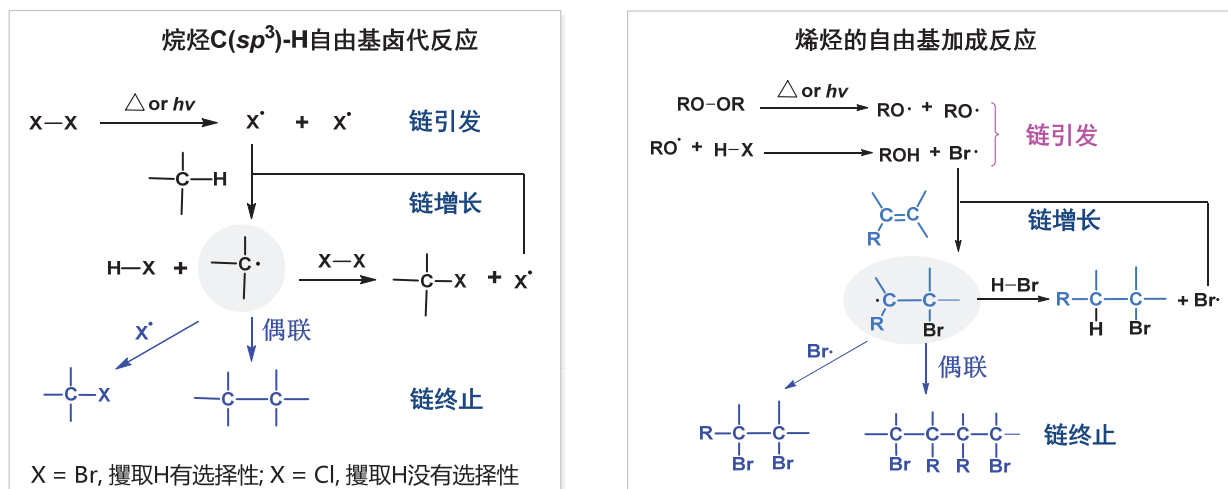


图2 烷烃和烯烃的自由基反应分析

### 2.4.3 自由基中间体的立体化学控制

由于自由基中间体的平面结构, 在没有任何手性物质影响的情况下, 通过自由基中间体成键所得到的目标分子通常都是外消旋形式。课堂中以正戊烷C2位置的卤化反应为例来分析自由基反应的立体化学。如图3所示, 按照自由基反应机理, 优先产生的卤原子从烷烃C2位置攫取一个氢原子, 会得到一个非手性的平面的三角形的碳自由基物种I。然后该碳自由基可以在任何一个面与氯自由基反应, 进而链终止形成卤化产物。因为反应中间体自由基是非手性的, 平面上下两种途径的反应概率是一样的。因此, 会得到两种对映异构体II和II', 其产生的量相等。综合结果就是得到的2-氯戊烷是外消旋体。通过自由基化学曲折的发展历史也不难发现, 自由基的立体化学控制长期以来一直是合成化学极具挑战的难题。

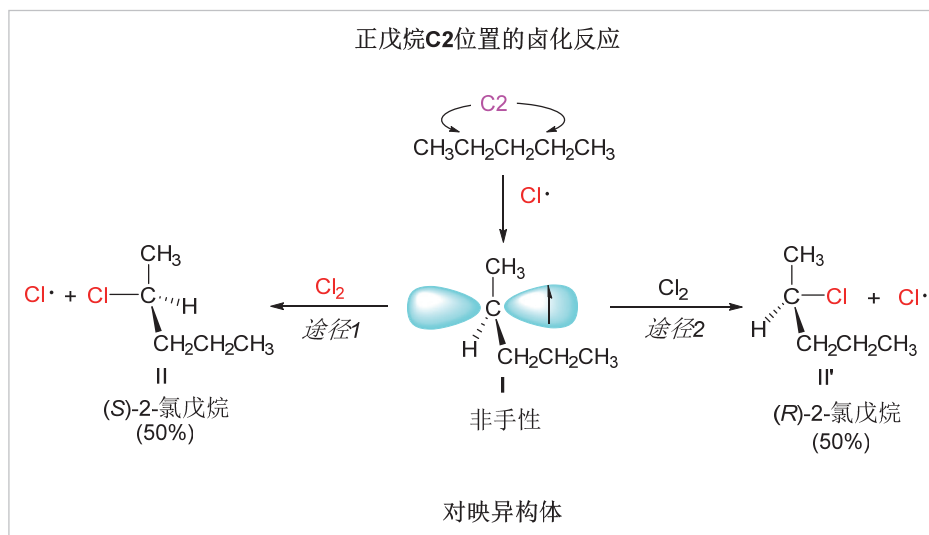


图3 以正戊烷C2位置的卤化反应分析自由基反应的立体化学

事实上, 在药物的研发过程中, 人们对药物的手性和立体中心的控制提出了非常严格的要求。课堂结合“反应停”事件作为一个思政案例, 引导学生认识到有机化学反应的立体化学控制对于医药领域、生命健康和社会发展的意义。近三十年来, 随着不对称催化领域的飞速发展, 基于过

渡金属催化和光催化等新型的不对称自由基反应在新化学键的构建方面取得了重要的研究进展。例如, Sibi课题组利用手性Lewis酸金属催化剂实现了不饱和羰基化合物高对映选择性的自由基加成反应<sup>[14a]</sup>。加州理工学院的Fu<sup>[14b]</sup>以及我国上海有机化学研究所刘国生研究员<sup>[14c]</sup>、南方科技大学刘心元教授<sup>[15]</sup>、华中师范大学的肖文精教授<sup>[16]</sup>等人发展了多种过渡金属催化的自由基参与的不对称化学, 引领了自由基化学的蓬勃发展。因此, 课堂中教师利用自身专业特点及研究内容, 特别注重通过实例讲授中国学者在不对称自由基化学方面的贡献: 介绍南方科技大学的刘心元教授团队, 经过多年的艰辛探索设计开发出系列金鸡纳碱衍生的三齿手性阴离子 $N,N,P$ -配体, 开发了高效的手性阴离子配体-廉价过渡金属铜单电子催化体系, 实现了一系列挑战性的化学转化, 包括消旋烷基卤代烃、饱和烷烃C-H键以及烯烃分子的不对称转化, 构建了丰富的手性C-C及C-杂原子键构建新方法, 引领了全世界在手性铜催化不对称自由基化学领域的变革等。同时介绍我们团队在金属铜/钴催化的自由基反应及其不对称反应中最新进展<sup>[17,18]</sup>。我国致力于自由基化学研究以及不对称自由基转化的研究学者有很多, 由于课堂时间限制, 我们还会布置课后作业, 要求学生查阅学习我国学者在自由基化学方面的突出贡献。

通过上述课堂-课外结合深入探索学习, 一方面给学生介绍了不对称自由基化学研究的前沿方向, 拓展了学生的学术视野, 同时又向学生展示了不对称催化合成的重要应用, 在知识学习中渗透了科学研究的素养要求, 有利于培养学生的学术自信和民族自豪感, 树立严谨、坚韧的科研态度和信念, 实现“课程与思政”的有机结合。

## 2.5 思政元素与教学内容融合

这里结合课程内容将课程思政元素自然引入, 不生搬硬套也不强行插入, 通过课堂内外联合渗透, 使学生能够自然接受并引发学习兴趣, 达到“育人无声”的效果。

(1) 通过课外查阅资料、课堂上讨论, 深化对自由基反应及其立体化学控制的理解, 了解自由基化学发展史相关素材, 感受我国有机合成化学家们在自由基化学领域中的不懈努力并取得了瞩目的研究成果, 实现对自由基反应由模糊零散到系统分析思考的进阶, 树立执着追求目标、具有国家长远发展的责任感和使命感的精神。

(2) 认识科学前沿中典型过渡金属催化的不对称自由基反应的研究成果, 让自由基化学理论由“抽象化”走向“具体化”, 实现理论知识的可视化、具体化、直接化, 提高教学效果, 明白自由基化学应用于国家战略和有机合成化学发展对国家繁荣和进步的重要性, 从而培养热爱祖国、报效国家的情怀。

## 2.6 具体教学过程

围绕深化以“立德树人”为根本任务的高校课程思政建设, 创建“课前置任务准备阶段、课中发展任务感知阶段、课后总结任务进阶阶段”的三阶段并举的任务驱动创新教学模式, 与“教-学-评”一体化相融合, 结合基础有机化学中零散的自由基反应完善本科生对自由基化学理论知识的构建<sup>[19]</sup>。

如图4所示, 课前置任务准备阶段, 实现以“学生为本”的线上-线下师生、生生互动合作教学模式, 小组内成员通过合作分工, 自行查阅自由基发展历史以及科学前沿的典型金属铜/钴/铁催化自由基反应的研究成果, 丰富教学素材资源; 课中发展任务感知阶段, 教师利用视频、动画情景化介绍自由基结构性质与产生方式等基础理论, 学生小组个性化自主合作、讨论自由基加成立体化学控制, 通过多媒体图片可视化自由基反应的国内研究成果, 构建师生共同体, 多措并举地建构自由基模块教学支架; 课后总结任务进阶阶段, 提出开放性思维导图总结的进阶任务, 继续进行线上-线下互动交流, 实现“师生、生生互动”式教学的及时评价反馈(具体评价量表见表2)。

作为合成化学中与离子型反应相媲美的重要合成工具, “自由基反应及其应用”相关知识模块的学时安排为6学时, 占“有机合成化学”专业选修课总课时的1/6。其中具体学时安排如表3所示, 分

三次完成。学习中，通过课堂趣味有深度的导入、精讲与讨论及科学汇报，深化学生对自由基反应的理解和认识；期间通过引入当前自由基化学领域科学前沿研究案例，分析我国研究学者在自由基化学前沿研究中的创新成果，将教学资源与科研成果及思政元素有机融合，促进学生在掌握新知识的同时，培养高尚的道德品质。

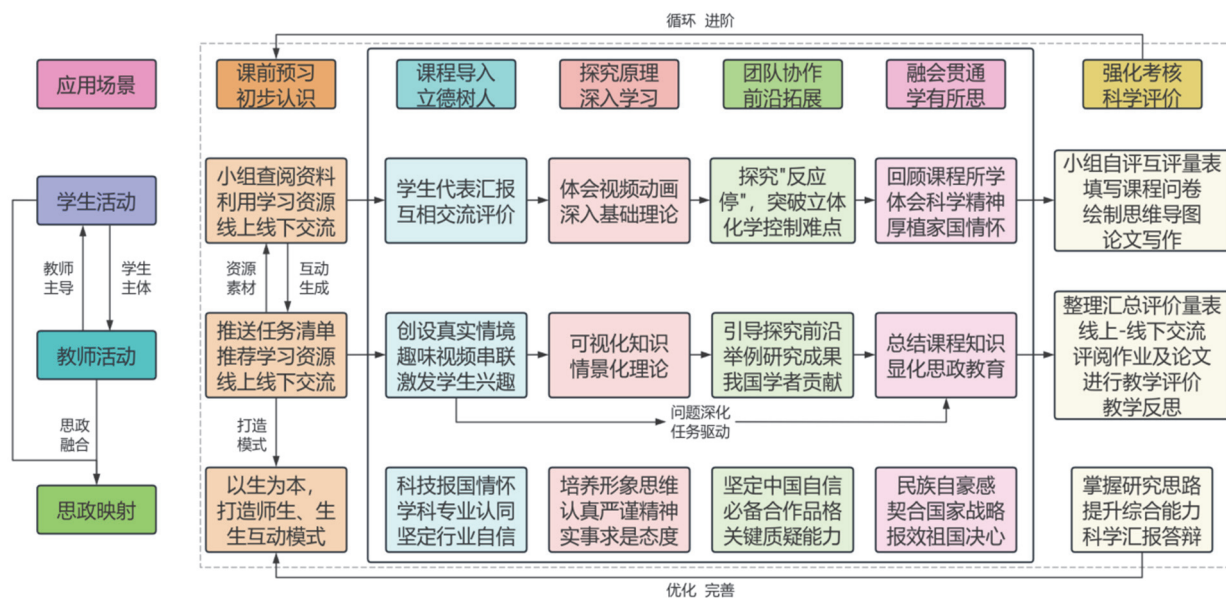


图4 具体教学设计流程图

表2 课程评价标准

考核项目	思政要点	评分标准	评分占比
课前预习	专业使命	网络预习课程完成情况	15%
纪律卫生	科学态度	按时上课、认真听讲	10%
学生汇报	专业素养	演讲内容准确、逻辑清晰	25%
小组讨论	团队协作	积极讨论、深入思考	25%
科学论文	科学素养	内容完整、逻辑清晰	25%

表3 自由基反应相关知识模块的学时分配

教学安排	环节	驱动任务及要求
第一次 2学时	(课前预习)-课程导入-知识讲解-小组讨论	了解自由基的发展史以及自然界中的自由基反应； 学习并掌握自由基的结构与性质、产生及经典的自由基反应； 了解当前自由基化学发展的前沿方向；学习并分析我国研究学者的部分案例
第二次 2学时	知识讲解-小组讨论-文献阅读(课后)	学习并掌握不对称催化反应技术； 分析并理解自由基中间体的立体化学控制； 学习并分析我国学者在不对称自由基化学研究领域的部分案例； 小组线下自主选择学习素材，继续深化对自由基反应的认识
第三次 2学时	知识讲解-科学汇报-小组讨论-讨论反思	学习并讨论我国学者在(不对称)自由基化学领域的重要研究贡献； 小组合作完成科学演讲(PPT汇报)，集体讨论、总结自由基反应的应用

### 3 结语

本文以“立德树人”的课程思政为指引，以“深度学习”为目标，通过设计“有机自由基反应及其应用”模块的学习，将有机合成化学课程与思政教育相互融合、相互贯通。采用可视化基础理论知识与科学前沿研究成果，结合线上-线下师生、生生互动教学模式和多元化的评价方式，完善并提升学生在基础有机化学学习中自由基化学知识模块的建构，培养学生主动学习的能力，并加强报效祖国的决心，同时提高课程思政教学的质量和效果。此外，通过对我国研究学者在不对称自由基反应方面创新成果的了解，培养学生查阅信息、合作讨论、自主学习、沟通交流及分享展示的高阶能力，增强学生的自豪感和民族自信心，培养学生的社会责任感、使命感与爱国意识、家国情怀，激励学生形成适应社会发展需要的必备品格与关键质疑能力，积极投身到社会主义建设当中。

### 参 考 文 献

- [1] 大思政课, 总书记心中的一件大事. 人民日报, 2022-05-22 (01).
- [2] 戴洁, 何奕, 陈帅, 程旭, 朱成建, 谢劲. 大学化学, **2022**, *37* (3), 2106001.
- [3] 马云鹏. 全球教育展望, **2018**, *47* (10), 52.
- [4] 陈汐平, 汤明清. 职教论坛, **2022**, *38* (11), 66.
- [5] 张茵, 孙威. 中国教育技术装备, **2023**, No. 24, 74.
- [6] 翟全国, 黄静伟, 包永胜, 伍晓春, 陈卓, 郭珍, 房喻. 大学化学, **2023**, *38* (10), 65.
- [7] 张志辉, 龙瀛, 刘培. 中国科技史杂志, **2011**, *32* (2), 243.
- [8] Liu, Y.-C.; Liu, Z.-L.; Chen, P.; Wu, L.-M. Physical Organic Chemistry. In *A Collection of the Invited Lectures Presented at the 8th IUPAC Conference on Physical Organic Chemistry*, Tokyo, Japan, Aug 24–29, 1986; Kobayashi, M., Ed.; Elsevier: Amsterdam, the Netherlands, 1986–1987.
- [9] (a) Liu, Y.-C.; Li, B.; Guo, Q.-X. *Tetrahedron Lett.* **1994**, *35* (45), 8429.  
(b) Liu, Y.-C.; Li, B.; Guo, Q.-X. *Tetrahedron* **1995**, *51* (35), 9671.
- [10] 高彤. 中国高校科技与产业化, **2009**, No. 5, 54.
- [11] 张正斌. 中国科技奖励. **2008**, No. 9, 58.
- [12] Xuan, J.; Xiao, W. *J. Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, *51* (28), 6828.
- [13] Xiao, H.; Zhang, Z.; Fang, Y.; Zhu, L.; Li, C.-Z. *Chem. Soc. Rev.* **2021**, *50* (11), 6308.
- [14] (a) Sibi, M. P. *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125* (39), 11796.  
(b) Wang, Z.; Yin, H.; Fu, G. C. *Nature* **2018**, *563*, 379;  
(c) Li, J.; Zhang, Z.; Wu, L.; Zhang, W.; Chen, P.; Lin, Z.; Liu, G. *Nature* **2019**, *574*, 516.
- [15] Chen, J.-J.; Fang, J.-H.; Du, X.-Y.; Zhang, J.-Y.; Bian, J.-Q.; Wang, F.-L.; Luan, C.; Liu, W.-L.; Liu, J.-R.; Dong, X.-Y.; *et al.* *Nature* **2023**, *618*, 294.
- [16] Jiang, X.; Jiang, H.; Yang, Q.; Cheng, Y.; Lu, L.-Q.; Tunge, J. A.; Xiao, W.-J. *J. Am. Chem. Soc.* **2022**, *144* (18), 8347.
- [17] Miao, H.; Guan, M.; Xiong, T.; Zhang, G.; Zhang, Q. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2023**, *62* (2), e202213913.
- [18] Yuan, X.; Zhang, Y.; Li, Y.; Yin, J.; Wang, S.; Xiong, T.; Zhang, Q. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2023**, *62* (48), e202313770.
- [19] 潘玲, 周仕东. 大学化学, **2021**, *36* (5), 2010074.