

## 化学“101计划”结构化学课程与教材的建设与改革 ——面向拔尖创新人才培养的深度探索

张庆丰<sup>†</sup>, 魏尚娥<sup>†</sup>, 侯华, 赵轩, 杨子轩, 庄林<sup>\*</sup>

武汉大学化学与分子科学学院, 武汉 430072

**摘要:** 在全球科技竞争加剧的背景下, 教育在培养创新人才中发挥关键作用。结构化学作为化学专业的核心基础课程, 其课程定位为以量子力学和群论为科学语言, 更深层次理解化学原理与现象。本文总结了化学“101计划”结构化学课程与教材的改革情况, 探讨了在一流课程标准下的改革路径。通过重构课程知识模块、构建知识框架与脉络以及多元化教学资源的引入, 推动了高等教育质量提升和化学学科的发展。

**关键词:** 化学“101计划”; 结构化学; 拔尖创新人才培养; 课程改革; 一流课程

**中图分类号:** G64; O6

## Construction and Reform of the Structural Chemistry Curriculum and Textbooks under the Chemistry “101 Plan”: an In-Depth Exploration for Cultivating Top-Notch Innovative Talents

Qingfeng Zhang<sup>†</sup>, Shang-E Wei<sup>†</sup>, Hua Hou, Xuan Zhao, Zixuan Yang, Lin Zhuang<sup>\*</sup>

College of Chemistry and Molecular Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China.

**Abstract:** In the face of intensifying global competition in science and technology, education plays a crucial role in cultivating innovative talents. Structural chemistry, a core foundational course for chemistry majors, employs quantum mechanics and group theory as its scientific language, enabling a deeper understanding of chemical principles and phenomena. This paper summarizes the reforms undertaken in the structural chemistry curriculum and textbook development under the Chemistry “101 Plan” and explores the pathways for reform in line with first-class curriculum standards. By restructuring the course’s knowledge modules, building a comprehensive knowledge framework, and introducing diversified teaching resources, these efforts have enhanced the quality of higher education and advanced the development of the chemistry discipline.

**Key Words:** Chemistry “101 Plan”; Structural chemistry; Cultivation of top-notch innovative talent; Curriculum reform; First-class course

当前, 全球科技竞争日益激烈, 国家对创新人才的需求日益迫切。为了适应这一需求, 教育部在2019年提出“双一流”建设, 随后在2021年启动了“101计划”, 并于2024年全面部署基础学科系列“101计划”推进工作, 旨在加强基础学科的建设, 特别是拔尖创新人才的培养。化学作为基础学科的重要组成部分, 其课程设置和教学改革成为当前教育改革的重要内容。作为化学专业的核心基

收稿: 2024-09-06; 录用: 2024-10-01; 网络发表: 2024-10-10

<sup>†</sup>共同第一作者, 对本文工作同等贡献

<sup>\*</sup>通讯作者, Email: lzhuang@whu.edu.cn

基金资助: 高等教育质量保障专项(化学“101计划”专项); 湖北本科高校省级教学改革研究项目(2023); 湖北省一流本科课程建设项目(2023); 武汉大学本科教育质量建设综合改革项目

基础课程之一, 结构化学课程在培养学生科学思维、创新能力和研究素养方面发挥着不可替代的作用。然而, 现有的课程在设计内容深度、教学方法和资源利用上尚存在不足, 难以充分满足新时代教育的需求。为此, 武汉大学化学与分子科学学院联合多所高校结构化学课程组基于化学“101计划”对结构化学课程与教材进行了改革与创新。

“101计划”提出了建设一批具有高阶性、创新性和挑战度的一流核心课程、一流教材、一流教师团队和一流实践项目的目标。这一计划为化学课程的改革提供了重要的指导方向<sup>[1]</sup>。具体到结构化学课程的建设中, 可以借鉴“101计划”提出的教育理念, 强化课程的系统性和综合性, 提升课程的创新性和前瞻性, 同时构建完善的实践教学体系, 从而推动课程内容、教学方法和资源建设的全面升级。

## 1 课程与教材建设目标、现状与挑战

### 1.1 课程建设目标

结构化学课程为化学专业二年级学生的必修课, 需要学生掌握微观粒子的性质和运动规律, 理解电子、原子、分子及晶体结构的基本理论。这一目标不仅要求学生掌握基础理论, 还需要他们能够应用这些理论工具分析和解决实际问题。因此, 课程设计应强调理论与实践相结合, 通过多种形式的教学资源(如多媒体、仿真实验等), 帮助学生从微观层面深入理解物质结构和化学现象的本质。此外, 课程应涵盖最新的科研成果和技术发展, 确保学生始终处于学术前沿<sup>[2]</sup>。

在能力培养方面, 课程设计需要注重学生的创新思维和科研能力的培养。通过引入复杂的化学问题和实例分析, 学生能够学会利用量子力学、群论等数理工具进行深层次的思考和推理。这有助于学生理解物质的微观结构与性质的关系, 也能提升他们解决实际科学问题的能力<sup>[3]</sup>。

此外, 结构化学课程的价值目标不仅是培养学生的科学素养, 还包括拓宽其专业视野, 培养其社会责任感和团队合作能力。通过结合前沿科研成果和实际应用, 课程设计应引导学生认识到化学研究对社会和科技发展的重要性。同时, 课程还应鼓励学生参与跨学科研究和国际交流, 以提高其全球视野和创新能力。

### 1.2 课程与教材的现状与挑战

目前, 结构化学课程内容涵盖了大量量子力学、线性代数、群论等数学和物理知识。这些内容对于化学专业的学生来说难度较大, 特别是缺乏与化学现象以及实际应用的联系, 导致学生在学习过程中感到困难。此外, 现有教材内容更新不及时, 未能充分反映化学领域的最新研究成果, 这在一定程度上限制了学生对化学前沿知识的了解。

传统的教学方式主要依赖于课堂讲授, 缺乏互动性和实践性, 难以激发学生的学习兴趣 and 主动性。在这种教学模式下, 学生的学习主要是被动接受知识, 缺乏深度思考和实践的机会。因此, 课程改革应注重课程设计和教学方式的创新, 增加互动式教学等环节, 鼓励学生积极参与课堂讨论和科研实践, 从而提高其学习效果和科研能力。

同时, 教学资源的利用存在较大局限性, 主要表现为教学内容单一、缺乏多媒体资源和仿真实验支持。这使得学生在学习过程中难以直观理解抽象的化学概念, 进而影响其学习效果。因此, 课程改革应大力引入多元化的教学资源, 利用现代信息技术(如虚拟仿真实验、在线学习平台等)丰富教学内容, 使学生能够通过多种途径获取知识, 并在实践中加以应用<sup>[4,5]</sup>。

## 2 课程与教材的主要内容

### 2.1 课程内容的模块化设计

为了更好地实现课程目标, 结构化学课程采用模块化设计, 将课程内容划分为量子力学与群论基础、原子与分子结构和固体与晶体结构三大知识体系。这样的分类主要基于知识体系的层次性、学科内容的系统性与复杂性和应用领域的广泛性这三个因素。

(1) 知识体系的层次性：结构化学的核心内容是理解物质结构的不同层次。量子力学和群论为整个学科提供了基础的数学工具和理论框架，帮助学生理解微观层面的化学现象。原子与分子结构的学习在此基础上进一步展开，深入讨论原子和分子内部的相互作用与结构特征。而固体与晶体结构则涉及更为宏观的物质结构，通过理解晶体和固体的排列规律，学生能够更好地理解材料的性质。

(2) 学科内容的系统性与复杂性：结构化学涵盖广泛而复杂的内容，每个模块都有独立的理论体系和应用领域。量子力学与群论涉及复杂的数学推导和物理理论；原子与分子结构涉及分子轨道理论、化学键理论等微观化学原理；固体与晶体结构则涉及晶格、能带理论等宏观结构。

(3) 应用领域的广泛性：结构化学在多个研究领域和应用中具有广泛影响，量子力学与群论为后续学习提供数学工具，原子与分子结构相关内容直接应用于分子建模、药物设计等领域，而固体与晶体结构则对材料科学、纳米技术等方向至关重要。

模块化设计能够帮助学生分别掌握每一领域的理论和应用，进而在未来科研和技术开发中更有针对性地应用这些知识。如图1所示，这三大体系又可细分为十个相对独立的模块，每个模块围绕一个核心主题展开：波动力学、矩阵力学、对称与群论、氢原子结构、原子光谱、分子光谱、分子轨道理论、固体能带理论、衍射理论和晶体结构。

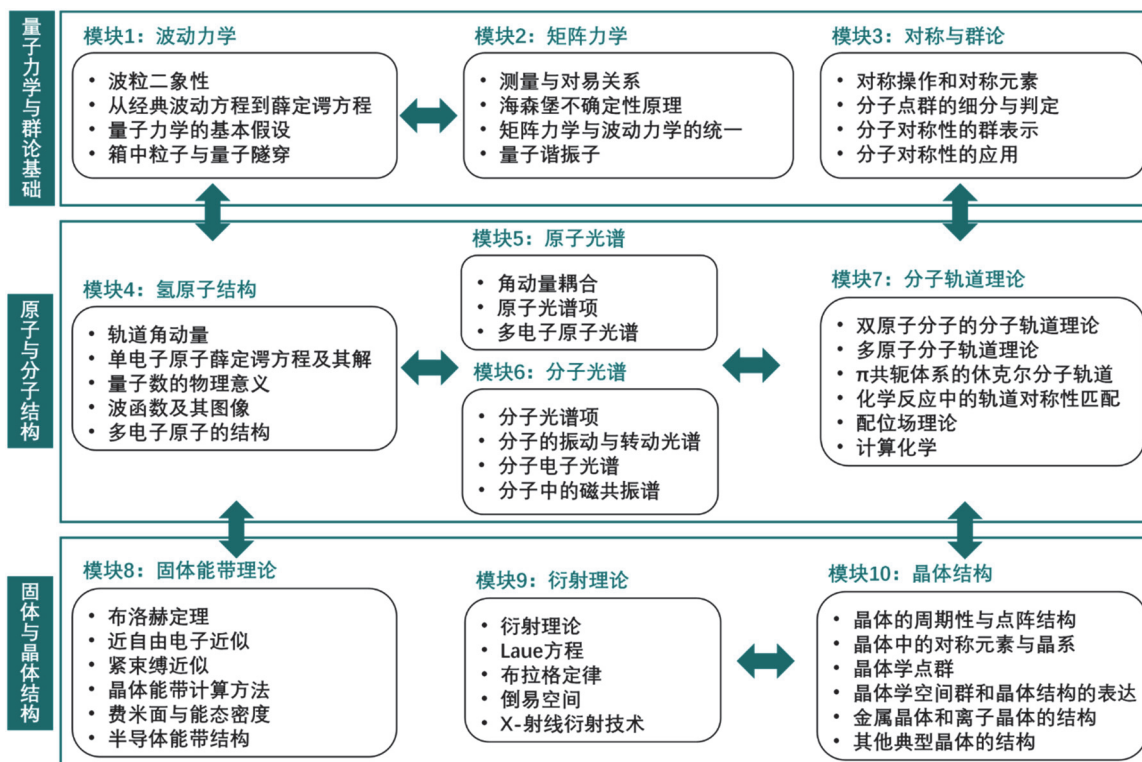


图1 结构化学课程知识模块关系

这十个相对独立的模块虽然各自围绕一个核心主题展开，但它们在知识体系中存在递进关系和内在联系。这种划分既体现了从基础理论到具体应用的层次性，也帮助学生系统地掌握结构化学的核心知识。

首先是基础理论的渐进引入，波动力学、矩阵力学和对称与群论这三个模块构成了结构化学的数学和物理基础，提供了理解量子力学和化学系统对称性的工具。这些基础模块帮助学生理解微观世界中的波粒二象性、能量量子化以及对称性原理，为后续对复杂结构的研究奠定了坚实的理论基础。波动力学主要解释了微观粒子的波动行为，矩阵力学则提供了另一种描述量子力学系统的数学

工具，而群论通过对称性的研究帮助解释分子和晶体的性质和结构。

其次是微观结构的逐步深入，氢原子结构、原子光谱和分子光谱模块集中探讨原子和分子层面的微观结构与性质。这些模块以量子力学为基础，解释了单个原子的能级结构、电子跃迁以及原子发射或吸收光谱的特征。随后，分子光谱则进一步探讨分子内部的运动、能级变化及其与电磁辐射的相互作用。氢原子结构是量子力学应用的最基本模型，提供了理解多电子原子结构的起点。原子光谱则通过探讨电子跃迁的方式，解释了更复杂原子体系的行为。分子光谱进一步扩展到分子层面，研究分子振动、转动等现象。

再次是化学键与分子结构的延展：分子轨道理论模块以量子力学为基础，详细探讨了分子中原子轨道的线性组合以及如何形成分子轨道。这一理论是理解分子结构、化学键强度和反应性的关键工具，连接了微观原子结构与宏观化学性质之间的桥梁。分子轨道理论是从分子光谱及氢原子结构的研究延展出来的，它进一步应用了量子力学的原理，帮助学生理解复杂分子体系中的电子分布和化学键性质。

随后完成了从分子到固体的扩展，固体能带理论和衍射理论模块则从分子结构的研究扩展到固体材料。这两个模块着重于解释固体材料的电子结构、能带形成以及晶体结构的对称性和周期性。固体能带理论通过量子力学的框架解释导体、半导体和绝缘体的性质，而衍射理论则是研究晶体结构的核心工具，主要通过X射线等手段揭示固体内部的原子排列规律。固体能带理论是分子轨道理论在固体材料中的应用，通过连续的分子轨道形成能带，解释电子在晶体中的运动行为。衍射理论通过实验手段进一步验证固体的晶体结构。

最后是宏观结构的综合性分析，晶体结构模块以群论和衍射理论为基础，详细探讨了固体中原子的三维排列与对称性，解释了不同晶体结构的物理与化学特性。这个模块将之前的量子力学、分子轨道理论与实验技术结合起来，全面分析固体和晶体的性质。晶体结构作为终极模块，建立在前对量子力学、分子轨道、衍射等理论的掌握之上，提供了固体材料在宏观和微观层面的完整解释。

为了更好地完成教学目标，对模块进行了知识点的细分。以模块二——矩阵力学为例(图2)，将其划分为：测量与对易关系、海森伯不确定性原理、矩阵力学与波动力学的统一和量子谐振子这四个知识点。并进一步进行了细分，将各知识点中的主要内容分为A、B、C三级，其中A表示基础和核心能力(必修)，B表示高级和综合能力(限选)，C表示扩展和前沿能力(选修)。知识点分级与分级教学有着异曲同工之处，可进一步实现因材施教的教学目的。

序号	知识点名称	主要内容	教学目标	参考学时
1	测量与对易关系	矩阵力学的发展要素(A);对易关系(A);测量顺序影响结果(B)	理解矩阵力学的发展要素;掌握对易关系的基本概念;了解测量顺序影响结果的本质	1
2	海森伯不确定性原理	不确定性原理(A);不确定度(A);电子的单缝衍射实验(B)	理解不确定性原理的本质;掌握不确定度的概念;了解电子的单缝衍射实验	1
3	矩阵力学与波动力学的统一	本征方程的矩阵解(A);狄拉克符号(A);矩阵的西变换(B)	理解狄拉克符号的基本概念;掌握本征方程的矩阵解;了解矩阵的西变换	1.5
4	量子谐振子	量子谐振子模型(A);谐振子的能级(A);简谐振动的跃迁选律(B)	理解量子谐振子模型的基本概念;掌握谐振子的能级方程和零点能的概念;初步掌握简谐振动的跃迁选律与振动光谱的关系	1.5
参考总学时				5

图2 模块二矩阵力学的知识点细分展示

## 2.2 教材的编写与更新

作为课程的重要组成部分，教材的编写与更新对课程的教学效果具有重要影响。结合“101计划”的理念，课程教材更注重内容的系统性和前瞻性，涵盖了最新的科研成果和前沿知识。此外，面向拔尖创新人才的培养，教材更加注重数学和物理的深入理解和推导，让学生从更深层次理解化学原理与现象。为了便于学生学习和加强数学基础，教材将相关重要的数学知识整理为数学附录(图3)。同时，辅助课程教学的结构化学课程教案已汇编成册。

**1 厄米矩阵**

厄米矩阵 (Hermitian matrix) 又称自伴随矩阵，其特征是第  $i$  行第  $j$  列矩阵元是第  $j$  行第  $i$  列矩阵元的复共轭：

$$a_{ij} = a_{ji}^* \quad (2m.1.1)$$

例如

$$\begin{pmatrix} 2 & 2+i & 4 \\ 2-i & 3 & -i \\ 4 & i & 1 \end{pmatrix} \quad (2m.1.2)$$

因此

$$A = A^\dagger \quad (2m.1.3)$$

厄米矩阵的一个重要性质是可以被对角化，而且得到对角矩阵的元素都是实数。换言之，厄米矩阵的特征值都是实数。

**2 酉变换与特征分解**

若

$$U^\dagger = U^{-1} \quad (2m.2.1)$$

则  $U$  称为酉矩阵 (unitary matrix) 或幺正矩阵。显然

$$U^\dagger U = U U^\dagger = I \quad (2m.2.2)$$

图3 教材设计：数学附录展示

## 3 课程教学安排建议

### 3.1 教学安排的灵活性与层次性

结构化学课程建议安排在第四学期开设，共4学分，64学时，先修课程包括无机化学、有机化学等基础化学课程以及高等数学等数学基础课程。结构化学课程在结合无机化学、有机化学实验科学现象的基础上，深入探讨化学键的形成以及分子、晶体的结构与性质，在更深层次理解化学原理与现象，为学生后续专业课程学习与科学研究实践打下扎实的基础。课程一般按照量子力学基础、原子结构、双原子分子、分子对称性、多原子分子、晶体结构等模块依次进行教学。在实际教学安排中，授课教师可根据学生的基础和学习需求，灵活调整各模块的教学顺序。

此外，课程注重教学的层次性，根据学生的不同学习基础与需求，设计了不同难度和深度的教学内容。例如，实施分级教学，因材施教、对症下药，这一体系实现了理论与实验相结合、基础与前沿相结合，达到了多维度培养人才的目标。同时将各知识点中的主要内容细分为A、B、C三级，进一步实现有的放矢的教学。

### 3.2 课内与课外学习的结合

为了提高学生的学习效果，课程教学注重课内与课外学习的结合。课内教学主要以理论讲解和答题讨论为主，帮助学生掌握课程的核心内容。课外学习则可以通过课后作业和在线学习平台等形式进行，帮助学生进一步巩固和扩展所学知识。

在每个模块结束后，设置了相应的课后作业，帮助学生复习和巩固所学内容。课程还可以利用在线学习平台虚拟教研室，为学生提供了更多的学习资源和学习机会。

### 3.3 教学反馈与评价机制的建立

为了确保课程教学的效果，教学反馈与评价机制的建立至关重要。在教学过程中，定期收集学生的学习反馈，了解学生在学习中所遇到的问题和困难，并及时调整教学内容和教学方法，帮助学生克服学习中的困难。

## 4 课程改革与建设的具体措施——以武汉大学为例

### 4.1 知识体系与教学内容的更新

为了满足新时代教育需求，结构化学课程对知识点进行了重新编排，重点强化了量子力学和群论等数学工具的讲解。通过引入成功科学家的事例，培养学生的科研素养，并融入最新研究成果，如量子化学和分子动力学，使学生掌握学科前沿动态并能应用于科研。同时，课程结合具体的化学实例，帮助学生理解数学工具在实际科研中的应用，从而提升其科研能力。

### 4.2 多元化教学资源的引入与利用

课程通过引入多媒体和虚拟仿真实验等多元化教学资源，改变了传统教学模式，帮助学生直观理解抽象的化学概念。引入Symmetry@Otterbein等开源资源和Crystal Maker专业软件，增强了学生对分子结构和晶体结构的理解。同时，课程利用网络平台共享教学资源，打造在线学习平台，提供丰富的学习材料和知识图谱，进一步拓展了学生的学习途径。

### 4.3 课程体系的重构与优化

针对学生的实际需求，对课程体系进行重新构建和优化。以结构化学为核心，辅以分子模拟实验、晶体化学、计算化学等课程，形成一个涵盖理论、实验和计算的综合课程体系。在这一体系中，理论课程与实验课程紧密结合，使学生能够在实际操作中验证和深化所学知识，提升其解决复杂科学问题的能力。其中结构化学实施分级教学，因材施教、对症下药，这一体系实现了理论与实验相结合、基础与前沿相结合，达到了多维度培养人才的目标。

### 4.4 教学方式创新与实施

课程创新注重互动式教学与案例分析的引入，通过线上答题软件激发学生参与讨论，提升课堂的互动性与启发性。同时，考核形式更加多样化，平时成绩、期中考试与期末考试相结合，综合评估学生的理论、实践和创新能力，激发学生主动学习和应用知识的积极性。

## 5 结语

在课程改革过程中，课程团队面临诸多挑战，包括课程内容更新、教学方式创新以及资源的整合与利用。为应对这些挑战，课程团队将结合“101计划”，迅速完成教案和教材的编写，并辅以习题册。此外，团队将与南开大学、北京大学、中山大学、厦门大学和浙江大学等高校合作，开展教学研讨和线上、线下教学观摩活动，如暑期教学研讨班。这些活动旨在培养结构化学的师资力量，并根据反馈意见实施持续性改革。同时，课程团队将继续推进教学方式创新，以提升课堂的互动性和多样性。

未来，结构化学课程的建设将更加注重理论与实践的紧密结合，力求通过系统的课程设计和多元化的教学资源，帮助学生掌握前沿知识，并提升其科研能力与创新意识。课程将融合传统知识理论与前沿科研成果，关注国家重大需求，强调课程知识学习的重要性和实际应用。教学方式方面，将结合多媒体和现代信息技术，强化互动式教学，以提高学生的学习积极性。评价体系将侧重于培养学生运用所学知识解决实际问题的能力和创造性思维。课程还将优化实验教学体系和实验资源，为学生提供更多实验机会和实践平台。此外，课程将进一步加强国际合作与交流，吸引更多国际化资源和师资力量，推动课程国际化发展，培养具有全球视野和创新能力的化学人才。

**致谢：**感谢教育部化学“101计划”课程组，所有参与“101计划”结构化学课程组的高校和教师，以及武汉大学对本工作的大力支持。

#### 参 考 文 献

- [1] 顾昊睿, 李宁, 刘占祥, 林旭锋. 大学化学, **2024**, *39* (7), 110.
- [2] 徐志广, 许旋, 罗琼, 王干全, 彭彬. 大学化学, **2024**, *39* (6), 195.
- [3] 李新, 申万岭, 朱利敏, 杨喜平. 化工时刊, **2024**, *38* (3), 79.
- [4] 李文佐, 刘绍丽, 焉炳飞. 山东化工, **2021**, *50* (20), 206.
- [5] 孙宏伟, 陈兰. 大学化学, **2021**, *36* (1), 2008056.