

复杂工程问题解决能力达成策略：多元研究性挑战式教学

杨化动¹, 张 霞¹, 石 敏², 花广如¹

¹华北电力大学机械工程系, 河北 保定

²华北电力大学控制与计算机学院, 北京

收稿日期: 2025年11月6日; 录用日期: 2025年12月12日; 发布日期: 2025年12月23日

摘要

复杂工程问题解决能力是新工科、新质人才培养的核心, 传统教学模式在学生复杂工程问题解决能力达成和高阶思维的培养方面存在不足。通过解析复杂工程问题的内涵, 提取机械系统复杂工程问题的特征, 提出了复杂度降解和解耦方法。在此基础上, 分析学生解决复杂工程问题应具备的能力, 基于建构主义的教育思想, 构建了复杂工程问题解决需具备的能力、复杂工程问题特征与教学策略之间的对应关系, 提出了多元研究性挑战式教学方法。该教学策略在华北电力大学机械设计课程实施的效果表明, 可显著提升学生复杂工程问题的解决能力。

关键词

复杂工程问题, 研究性教学, 建构主义, 复杂性降解

Strategies for Attaining the Competence of Solving Complex Engineering Problems: Based on Multi-Faceted Research-Oriented Challenging Teaching

Huadong Yang¹, Xia Zhang¹, Min Shi², Guangru Hua¹

¹Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding Hebei

²School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: November 6, 2025; accepted: December 12, 2025; published: December 23, 2025

Abstract

The ability to solve complex engineering problems constitutes the core of cultivating new engineering and new-quality talents. Traditional teaching models fall short in achieving students' ability to solve complex engineering problems and fostering their higher-order thinking. Through analyzing the connotation of complex engineering problems and extracting the characteristics of complex engineering problems in mechanical systems, a method of complexity degradation and decoupling was put forward. On this basis, the capabilities that students should have in solving complex engineering problems were analyzed. Based on the educational ideology of constructivism, the corresponding relationships among the capabilities necessary for solving complex engineering problems, the characteristics of complex engineering problems, and teaching strategies were established, and a multi-dimensional research-oriented and challenge-based teaching approach was proposed. The effect of this teaching strategy implemented in the mechanical design course at North China Electric Power University indicates that it can significantly enhance students' ability to solve complex engineering problems.

Keywords

Complex Engineering Problems, Research-Based Teaching, Constructivism, Complexity Reduction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 问题的提出

复杂工程问题解决能力是卓越工程师人才培养的重要一环，目前对于复杂工程问题的内涵和复杂工程问题解决能力的达成策略研究尚处于探索阶段。对于复杂工程问题内涵的研究，存在三种研究路径，第一种是基于工程教育认证标准进行分析，结合专业特点，分析复杂工程问题应具备的特征[1]-[4]。第二种是在对工程教育认证标准解读的基础上，分别从“工程”和“复杂”含义分析复杂工程问题的内涵[5]-[9]。第三种是在第二种研究路径的基础上，从复杂性理论视角、专业视角和工程教育认证视角多维度剖析了复杂工程问题的内涵[10]。然而，由于现代工程技术高度集成，且规模、影响范围和不确定性都在增加，所涉及技术与非技术要素的复杂性在提高。同时，基于机械设计过程的复杂性理论，机械系统具有非线性、时变性、强耦合性和开放性等特征。因此，对于机械系统复杂工程问题内涵的研究应基于复杂系统理论和机械设计过程复杂性理论，分别从复杂系统特征、现代工程特征、机械设计过程复杂特性三个维度进行讨论。

对于复杂工程问题解决能力达成策略的研究，研究学者认为其关键在于毕业设计等实践环节，可以通过教育结构、教育理念、项目实践、校企结合等途径提升问题解决能力。林健提出，复杂工程问题解决能力可以通过研究性教学达成。邓娇娇提出，采用复杂性降解的方法，可以有效达成复杂工程问题解决能力。然而，目前对于复杂工程问题解决能力达成和提升策略的研究，大多基于教学实践和经验提出新的教学模式和教学改革途径，尚未在复杂工程问题内涵、卓越工程师具备的能力以及教学模式之间建构映射关系。

本文首先探究复杂工程问题的内涵，在此基础上结合复杂机械系统的技术和非技术特征，提出现代

工程师应具备的能力，进而基于 OBE 和建构主义教育理念，研究达成该能力的研究性教学模式。

2. 复杂工程问题内涵剖析

复杂工程问题中的“复杂”缺乏统一和确定的概念，对复杂工程问题的理解，应首先对其内涵进行解析。本文从复杂性理论、现代工程的技术与非技术特征以及机械系统特征三个角度，剖析机械系统复杂工程问题的内涵。

2.1. 复杂性理论视角

对于复杂一词含义的理解，从汉语的语义来说，可以分别从“复”和“杂”的含义来解释。“复”指的是复合和综合，而“杂”指的是杂乱，因此复杂问题指的是多种关系耦合和多学科知识交叉，运用常规知识和技术无法解决的问题。

复杂是系统的属性，基于复杂系统理论的视角，现代机械系统具有复杂系统的非线性、不确定性、开放性、多样性和无序性等特征。一方面，对于机械设计领域要解决的复杂工程问题而言，由于其研究对象—机械系统的复杂特征愈发明显，且呈现日益提高的趋势，导致实际工程问题的复杂性在提高。另一方面，机械设计领域的工程问题也涉及多学科和极端工况，提升了设计问题的复杂性。

2.2. 现代工程的技术与非技术特征视角

对于复杂工程问题的内涵，应从“复杂”和“工程”两个层面进行解析。对于现代工程而言，由于技术高度集成、涉及的利益相关者在增加、不确定性提高、工程规模和影响范围日益增加，因此工程的范围和外延明显增加，这就需要设计工程师需要考虑更多的因素。随着工程范围的拓宽，工程问题的复杂性体现在两个方面，一个是技术层面的复杂性，另一个是非技术层面的复杂性。

工程问题涉及人—机器—环境之间的协调，因此除包含技术要素之外，还包含复杂的非技术要素。传统的工程教育重在关注学生技术能力的培养和提高，然而对于卓越工程师的培养来说，除考虑技术能力的提高之外，还需要考虑非技术能力的提高。非技术要素包括经济要素、环境要素、社会要素和文化要素等，对于机械系统设计来说，需要考虑与设计活动相关的市场分析、需求分析、环境影响和经济性分析，这就要求学生具备系统分析能力、辩证思维能力和组织、沟通能力等。

2.3. 机械系统特征视角

Table 1. Characteristics of complex engineering problems in mechanical systems

表 1. 机械系统复杂工程问题的特征

特征	描述
C1 工程知识的深度运用	综合运用多学科知识解决工程问题
C2 非线性、强耦合非常规问题	探究多因素并解耦进而解决问题
C3 需要抽象思维和创新意识建立模型	强调创新思维、突破常规思维寻找解决问题新思路
C4 工程范围与外延拓展问题	考虑最新技术、工程发展、经济性等非技术因素
C5 涉及多利益相关者	多学科、极端运行环境问题涉及多主体的协调和冲突
C6 综合性、集成性和不确定性问题	以系统观和整体观识别问题特征

现代机械系统具有智能化、集成化和柔性的特点，机械系统的发展趋势为高效率、高精度、极限功能和高品质。因此为满足用户复杂的功能需求和极端工况下运行的需要，机械系统结构和功能呈现出非线性、时变性、强耦合性和开放性等复杂系统所具备的特点。基于复杂系统理论和设计过程的复杂性

理论,机械系统的设计须从功能角度出发,研究功能结构的非线性、时变性和解耦方法,获得功能解和设计方案。另外,技术层面的复杂性还体现在现代机械系统的设计需要具备多学科交叉的知识,设计人员需要具备系统观和科学观,需要具备现代设计方法,同时需要了解现代制造技术(尤其是增材制造技术)对设计方法和技术的影响。

基于上述三个角度对复杂工程问题内涵的解析,可以总结出机械系统复杂工程问题所具备的特征如表1所示。

3. 复杂工程问题的降解与解耦

3.1. 复杂工程问题分类

对机械系统而言,由于现代工程以及机械系统所具备的特征,因此机械系统复杂工程问题具备技术和非技术因素的复杂性,这就要求在人才培养方面,需要分别从技术和非技术能力两方面进行考虑。对于技术能力方面,要求学生具备数学及力学建模、设计资料运用、创新、问题分析与解决以及多学科知识协同的能力。对于非技术能力方面,要求学生具备系统思考、伦理判断、沟通、辩证思维和组织领导能力。

对于复杂性问题的解决,研究学者提出可以采用“还原论”或“整体论”的方法。在复杂工程项目的管理中,通过工作分解结构(WBS, Work Breakdown Structure)可以将复杂的项目进行分解,从而降低项目的复杂度。对于复杂工程问题复杂性的降解,可以引入WBS分解的思想。基于对复杂工程问题内涵的解析,分别从工程问题的技术复杂性和非技术复杂性两个维度进行考虑,复杂工程问题可以分为如下四种类型,见图1:

- (1) A类:简单工程问题,即可以运用成熟技术和理论解决的简单关联关系应用场景的工程问题;
- (2) B类:强关联性工程问题,即可以综合运用较为成熟的技术和理论解决具有多主体、多种耦合关系存在的工程问题;
- (3) C类:系统工程问题,即需要运用新的理论和技术解决简单关联关系应用场景的工程问题;
- (4) D类:多冲突复杂工程问题,即需要运用新技术和新理论解决具有多主体、多种耦合关系存在的工程问题。

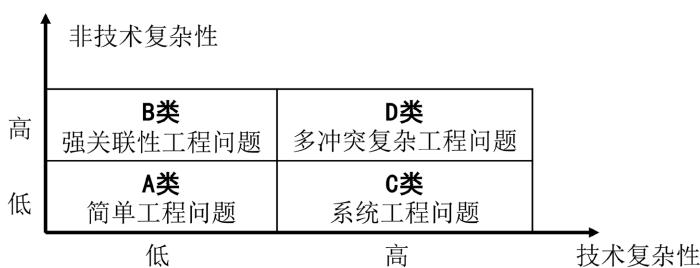


Figure 1. Classification of complex engineering problems
图 1. 复杂工程问题分类

对于A类问题,从教学的视角,可以通过课堂教学和实践环节培养学生对此类工程问题的解决能力,使学生具备初步的工程问题分析能力。对于B类、C类和D类问题来说,存在技术或非技术的高阶复杂性,因此解决此类问题,需要从技术或非技术维度进行复杂性的降解与解耦。

3.2. 技术复杂性降解

技术复杂性可以从技术和复杂性两个维度进行分析,技术可以理解为由子技术迭代而成,而复杂性

可以理解为由简单性迭代而成，所以技术复杂性可以理解为由技术简单性迭代而成。单个技术的复杂性(C)可以通过时间复杂性(C_T)、结构复杂性(C_S)和知识复杂性(C_K)来进行表征，由于现代机械系统具有非线性和集成性的特点，所以需采用网络理论与方法表示机械系统复杂工程问题的复杂性，如图2所示。

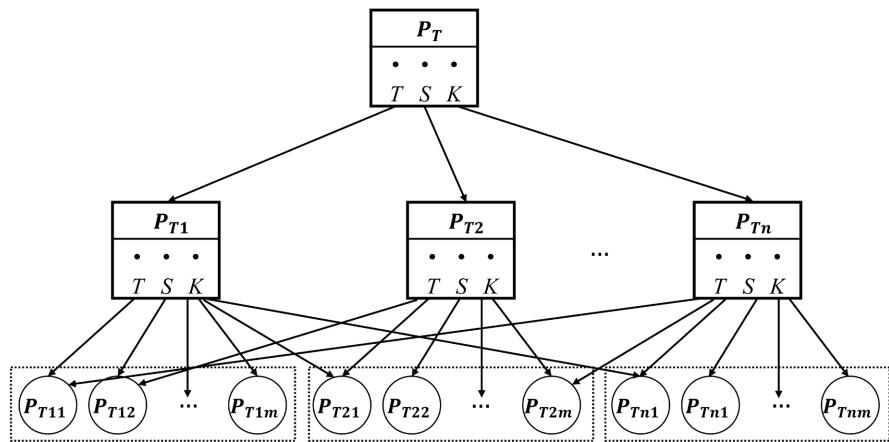


Figure 2. Technical complexity of engineering problems
图 2. 工程问题技术复杂性

从图2中可以看出，现代机械系统复杂工程问题的复杂性可以通过技术的分解进行降解，将B类、C类和D类问题中所涉及到的技术分解为若干个具有耦合关系的A类问题中的子技术。对于技术的分解，可以采用项目管理中的WBS方法将复杂工程问题中所涉及的技术进行层次化分解，经过多级分解，最终划分为若干简单技术。

3.3. 非技术复杂性降解

对于现代工程而言，工程活动的全过程包括工程构思、可行性研究、工程决策、项目规划、工程设计、调查勘测、施工制造、运行使用、管理维护和监测评估等环节。在这些环节中除了技术层面之外，由于工程所涉及因素的增加，所涉及的主体增多，还需要具备管理沟通、问题协调、工程规范、工程伦理等方面的能力。极端运行环境特质和多责任主体耦合提升了复杂工程问题的复杂度，对于复杂工程问题的非技术复杂性可以通过WBS方法进行复杂性的降解。

4. 复杂工程问题解决能力的提升策略(课堂教学)

复杂工程问题解决能力的提升，大多将关注点集中在实践环节的教学，例如课内实验、工程训练、课程设计和毕业设计。通过实践环节教学模式的改革，研究发现可以提高学生复杂工程问题的解决能力。但是，从各专业人才培养方案中可以看出实践环节的比例通常在35%左右，因此仅仅通过实践环节提高复杂工程问题的解决能力是不足的，应通过四年的贯通培养，结合课程教学和实践环节，统筹教学模式和实践教学方式的改革。

4.1. 解决复杂工程问题需具备的能力

针对机械设计类课程，从上述复杂工程问题内涵的解析和复杂工程问题复杂性的降解，可以发现提高学生复杂工程问题的解决能力，应提高学生如下能力。

(1) 工程知识的运用能力

复杂工程问题与工程知识之间关联关系的建构，需要通过工程知识的不断运用和实践得以解决，这

就要求学生必须具备工程知识的运用能力。

(2) 问题发现 - 分析 - 解决能力

面对复杂度日益提高的复杂工程问题，其解决需要具备从复杂场景中识别问题的能力，需要具备解耦复杂关联关系、基于科学思维分析与解决问题的能力。

(3) 创新思维与工程建模能力

将复杂工程问题进行抽象化建模处理，是降低复杂性、创新运用已知科学知识与方法解决未知工程问题的有效途径，这就需要学生具备创新思维与工程建模能力，应对复杂场景、多关联主体、多技术冲突带来的挑战。

(4) 工程思维与批判思维能力

复杂工程问题的解决，不仅需要在技术上突破现有方法，敢于质疑与批判现有的技术，还需要综合考虑工程伦理、工程规范和工程实践标准，这就需要学生具备工程思维和批判思维能力。

(5) 组织、协调能力与系统观

复杂工程问题涉及多责任主体利益方，问题解决需要从机械系统整体出发，以系统观分析机械系统，统筹耦合因素与场景，协调处理与解决复杂工程问题。

4.2. 复杂工程问题达成策略 - 多元研究性挑战式教学模式

在传统的人才培养模式中，课程教学重点关注知识点的讲授与学习，实践环节重在知识的应用。然而受限于实践条件的限制，目前的实践环节培养质量在多数院校中远未达到预期目标，因此学生复杂工程问题解决能力的培养不足。这就要求在大学四年的培养中，拟定对应的教学策略，在课程教学环节和实践教学环节，全程提升学生复杂工程问题的解决能力。在课程教学环节中，需结合课程的特点，探索培养学生问题发现、问题探究、问题解决的能力。

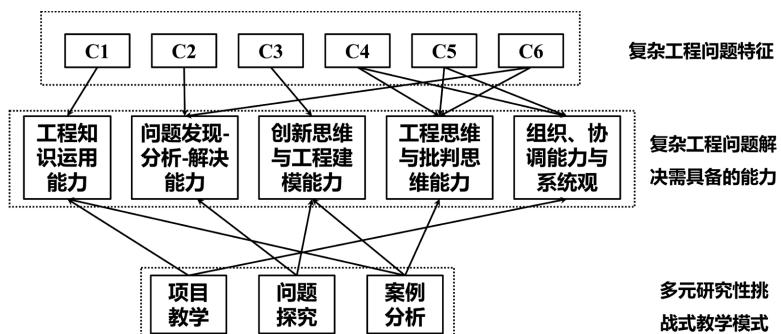


Figure 3. The relationship between teaching strategies, abilities and characteristics
图 3. 教学策略 - 能力 - 特征关系

基于现代建构主义的教育思想，从学生的认知规律和知识建构过程出发，学生应主动建构知识。然而，在传统教学模式中，学生知识建构是被动的，缺乏对学生探究能力、问题识别、创新思维和批判思维的训练。因此，在课程教学环节，应改变原有的课程教学模式，基于现代建构主义的教育思想，通过对复杂问题的降解和解耦，采用问题驱动 - 项目教学 - 案例分析-IPD (Integrated Product Development)相结合的多元研究性挑战教学模式，提升学生复杂工程问题的解决能力。运用此教学模式，复杂工程问题解决需具备的能力、复杂工程问题特征与教学策略之间的对应关系如图 3 所示，可以看出单一的教学方法难以全面培养学生复杂工程问题的解决能力，需要采用多元研究性的教学方法。

从图 3 中可以看出，通过项目教学、难度逐级提升的问题链式探究教学和案例分析，可以达到提高

复杂工程问题解决能力的目标。

以《机械设计》课程带传动的受力分析为例，该教学模式的实施策略如图 4 所示。

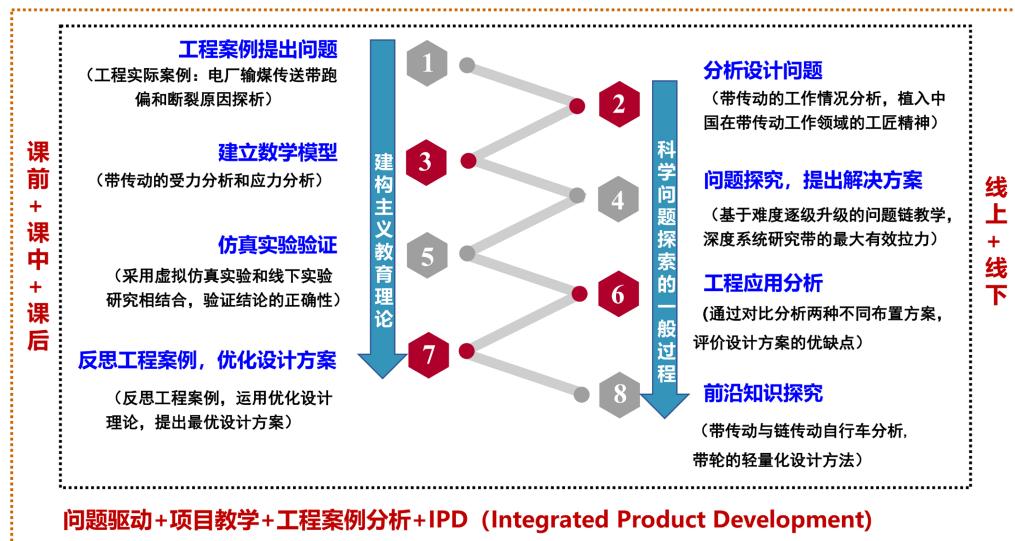


Figure 4. Teaching strategies for force analysis of belt drive

图 4. 带传动受力分析教学策略

以带传动的受力分析为例，如图 4 所示，课前在线上学习平台探究由广东惠州平海电厂的企业专家提出在火力发电厂燃煤输送系统存在的皮带跑偏和断裂问题，学生分组讨论该现场问题，形成答案上传在线上平台。课中，根据学生的答案，植入思政元素，提醒学生注意设计表述的严谨性。通过对该问题的分析，引导学生运用力学知识对带传动进行受力分析。在受力分析过程中，以带的三种状态为主线，设置不同难度等级的问题链进行课堂问题探究，获得研究结论。为验证所获得结论的正确性，采用虚拟仿真实验进行验证。将验证正确的结论应用于实际的工程分析，评价设计方案的优劣，并采用优化设计理论提出最优设计方案。课后，采用非标准化问题形式探究学科前沿知识。

4.3. 多元研究性挑战式教学流程设计

教学活动设计基于 BOPPPS 教学模型，充分利用全时空和多维度展开，采取线上、线下相结合，课前、课中和课后相结合，将各个教学活动的开展分配到线上、线下和课上、课下。利用渐进式、多层次的教学活动加强学生深度学习。课前，基于线上平台的导入和目标，引导学生自学，所采取的教学策略为基于案例的线上研学自测和“挖坑”测，提升课前自学的难度；利用前测激励课前研学，并为课堂教学提供依据；课堂开展参与式学习，教师作为引导者，学生化身为设计师，包括基于工程案例的问题探究、小组协同完成设计任务，引发学生深度思考；课后，基于线上平台进行后测和总结，利用个人和小组拓展任务提升学生思辨能力和工程能力。师生双向进行课后总结和反思。

5. 教学效果分析

以 2019 级机械工程专业《机械设计》课程为例，对比应用本教学策略的改革课堂与平行课堂，从学生的学习成绩统计中可以发现，改革课堂在中高阶知识的得分率高出平行班 12.4%。另外，改革课堂学生的项目作业得分率比平行班高 10.1%，学科竞赛获奖比例比平行班高 45%，因此可以看出所提出的教学策略有助于学生复杂工程问题解决能力的培养。该教学模型目前已推广到机械工程专业的《机械原理》

《机械设计基础》等课程，在工科类课程中具有一定的推广性。

基金项目

河北省高等教育教学改革研究与实践项目“新工科人才培养视域下机械设计类课程‘链式协同递阶探究’教学方法创新改革”(2023GJJG419); 河北省研究生教育教学改革研究项目“‘学术为基、育人为要’机械类研究生思辨能力培养模式研究”(YJG2024123); 教育部高等学校机械基础课程教学指导分委员会教育科学项目“基于BOPPPS和ARCS教学模式的多元研究性挑战式教学模式研究”(2022-JXJC-JXSJ-12)。

参考文献

- [1] 高秋香. 基于复杂工程问题的学科竞赛模式探索与实践[J]. 中国地质教育, 2022, 31(2): 113-116.
- [2] 孔德慧, 李敬华, 王立春, 张勇. 工科课程思政建设及其作用研究——聚焦工科学生复杂工程问题解决能力的培养[J]. 高教学刊, 2022, 8(14): 82-85+89.
- [3] 张立强. 如何理解复杂工程问题与毕业要求指标点的分解[J]. 大学教育, 2020(7): 33-36.
- [4] 蒋宗礼. 本科工程教育: 聚焦学生解决复杂工程问题能力的培养[J]. 中国大学教学, 2016(11): 27-30+84.
- [5] 林健. 如何理解和解决复杂工程问题——基于《华盛顿协议》的界定和要求[J]. 高等工程教育研究, 2016(5): 17-26+38.
- [6] 杨毅刚, 孟斌, 王伟楠. 如何破解工程教育中有关“复杂工程问题”的难点——基于企业技术创新视角[J]. 高等工程教育研究, 2017(2): 72-78.
- [7] 林健. 新工科人才培养质量通用标准研制[J]. 高等工程教育研究, 2020(3): 5-16.
- [8] 包海涛, 王殿龙, 杨睿, 高媛, 陈庆红. 面向解决复杂工程问题的机械基础实验教学研究[J]. 实验室科学, 2020, 23(4): 158-161.
- [9] 王博, 张志锋. 工程教育背景下毕业要求及其内涵观测点的分解——以软件工程专业为例[J]. 河南教育(高等教育), 2021(8): 96-98.
- [10] 邓娇娇, 邹艳艳. 复杂工程问题解决能力达成教学实践: 基于复杂性降解的研究[J]. 高等工程教育研究, 2022(1): 62-67.