

航天器系统导航估计创新驱动课程体系建设研究 ——基于“科教融合－校企协同－虚实结合” 的工程教育范式重构

高艾，徐瑞，尚海滨，朱圣英

北京理工大学空天科学与技术学院，北京 100081

DOI:10.61369/ETI.2026050009

摘 要： 面向我国深空探测任务对航天器自主导航能力的迫切需求，本文在最新导航估计技术进展的基础上，探索了创新驱动型课程体系的构建路径。通过“科教融合、校企协同、虚实结合”的工程教育范式重构，形成了一套面向航天器导航系统的新型课程体系。该体系紧密结合学科前沿技术、工程实践任务与产业需求，重点培养学生的创新能力、工程实践能力及自主学习能力。基于 OBE（成果导向教育）理念，构建了三级能力指标体系与“双螺旋”课程结构，实现理论—实践深度互促的教学模式创新。课程实施表明，该体系在能力培养、课程质量及资源建设方面取得显著成效，具有良好的推广价值。最后，本文展望了智能化、数字孪生等技术引领下的后续发展方向。

关 键 词： 科教融合；工程教育；创新课程体系；航天器导航；OBE 框架

Research on the Construction of an Innovation-Driven Curriculum System for Spacecraft System Navigation and Estimation — An Engineering Education Paradigm Reconstruction Based on “Integration of Science and Education, University–Industry Collaboration, and Virtual–Real Synergy”

Gao Ai, Xu Rui, Shang Haibin, Zhu Shengying

School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

Abstract： In response to the urgent demand of China’s deep-space exploration missions for enhanced autonomous navigation capabilities of spacecraft, this study explores the construction pathway of an innovation-driven curriculum system based on the latest advances in navigation and estimation technologies. By restructuring the engineering education paradigm through the integration of science and education, university–industry collaboration, and the combination of virtual and physical resources, a novel curriculum system oriented toward spacecraft navigation systems is established. This system closely aligns disciplinary frontiers, engineering practice tasks, and industrial demands, with a focus on cultivating students’ innovation capability, engineering practice competence, and self-directed learning ability. Guided by the Outcome-Based Education (OBE) framework, a three-level competency indicator system and a “dual-helix” curriculum structure are developed, enabling a teaching model that deeply integrates and mutually reinforces theory and practice. Implementation results demonstrate that the proposed curriculum system has achieved significant outcomes in competency development, course quality, and educational resource construction, and exhibits strong potential for broader dissemination. Finally, future development directions under the guidance of intelligent technologies and digital twin concepts are discussed.

Keywords： integration of science and education; engineering education; innovation-oriented curriculum system; spacecraft navigation; OBE framework

一、绪论

（一）国家战略需要

近年来，我国深空探测工程进入了加速演进的新阶段，航天

器自主导航技术在任务成功率与系统可靠性中的战略地位日益凸显。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2021—2035）》明确提出，到2030年前实现火星采样返回、2035年前完成小行星采样与原位探测，并在2045年前基本建成地月空间经济区^[1-3]。这

课题项目：智启深空·创研未来—航天器系统导航估计创新驱动课程体系建设。

作者简介：高艾（1984—），女，北京理工大学空天科学与技术学院，教授，博士。

一系列战略目标不仅标志着我国深空探测从“走出去”迈向“走得远、走得稳”，也对深空任务的导航系统精度、算法鲁棒性、全链路自主性与任务可信性提出前所未有的高标准要求^[4-6]。

教育部推进的“新工科”建设也对航天人才培养提出新的要求^[7]。工程教育应面向国家战略需求，通过跨学科融合、产教协同创新和科研—教学深度结合，构建能够支撑未来科技和产业发展的新型人才培养体系。

（二）教学改革趋势

从我国工程教育改革的总体趋势来看，教育部《新工科研究与实践项目指南》明确提出，要加快破解当前工程人才培养中“学科壁垒森严、实践平台落后、评价体系单一、课程生态性不足”等一系列瓶颈问题，推动教学内容体系化、教学模式智能化、实践体系真实化和人才培养复合化。在航天器导航领域，这些结构性问题呈现得更为典型且更具挑战性，直接影响深空探测任务时代对高水平工程人才的供给能力。

因此，构建基于“科教融合—校企协同—虚实结合”的航天器导航新型课程体系，已成为新时代工程教育改革的关键突破口。该体系应贯穿从理论认知、仿真验证、半物理试验到工程级验证的多层级教学链条，通过跨学科知识融合、任务驱动式学习、工程数据支撑与智能化教学手段，实现知识、能力与视野“三断层”的系统性弥补，为我国深空探测计划培养能够承担关键技术攻关的高水平创新型工程人才。

二、课程建设基础与现状分析

（一）课程基础：学科体系与科研支撑

航天器自主导航课程体系的构建建立在坚实的学科基础与持续的科研实践之上，也源自于深空探测任务不断升级所带来的工程需求牵引。本课程体系以“基础理论支撑—科研成果转化—工程需求牵引”的三重驱动力构成教学改革的底座。在学科基础方面，航天器导航涉及动力学建模、轨道力学、空间传感器测量、随机过程与滤波理论等多门学科的交叉融合。传统教学往往以线性方式展开，使学生难以在不同知识模块之间建立联通性。针对这一问题，本研究团队构建了覆盖导航建模、量测系统、融合算法到系统级性能分析的知识图谱，将散落在多个课程中的知识体系进行结构化重组，从而形成面向“任务链”的完整知识链条。

表1 三级能力指标体系

能力层级	具体指标	达成度评价方式
基础能力	卫星轨道摄动方程推导能力	课程论文+课堂测验
核心能力	多传感器数据融合算法设计能力	仿真实验+代码评审
创新能力	自主导航系统架构设计能力	课程项目+专利申请

在课程基础建设中，科研成果转化是极其关键的环节。深空任务具有遥远、延迟大、环境未知等特征，因此相关的导航技术往往难以直接从文献中获得，而需要来自真实任务的实践经验。本课程体系充分利用团队多年参与国家航天任务积累的研究成果

与工程经验，将其转化为高真实度的教学资源。让学生看到真实航天任务如何从模型进入工程、从算法进入硬件。这些科研材料的系统化应用，使课程体系获得了常规课堂难以具备的“工程真实度”，极大提升了教学内容的时代性、真实性与应用价值。

（二）总体设计：OBE理念与“双螺旋”结构

在总体设计方面，本课程体系以OBE（Outcome-Based Education）理念为核心，通过构建可评价、可追踪的导航能力指标体系，将教学目标从“知识传授型”转变为“能力达成型”。能力体系按照学生成长路径与任务需求分为基础能力、核心能力与创新能力三个层次。基础能力强调动力学建模、误差分析与数值仿真的扎实掌握，使学生具备理解航天器状态估计问题的底层逻辑；核心能力对应任务工程需求，包括多传感器融合算法的构建与调参、滤波稳定性评估、量测链设计等，这是实现深空任务自主导航的关键；创新能力则面向未来任务需求，鼓励学生在视觉—惯性—无线电深度融合、弱可观测环境下的智能估计、极端条件下的异常量测鲁棒处理等方面开展探索性学习。三级能力体系形成层层递进的目标结构，使教学内容能够明确地指向能力输出，实现教学路径与培养目标的可量化对齐。

理论-实践

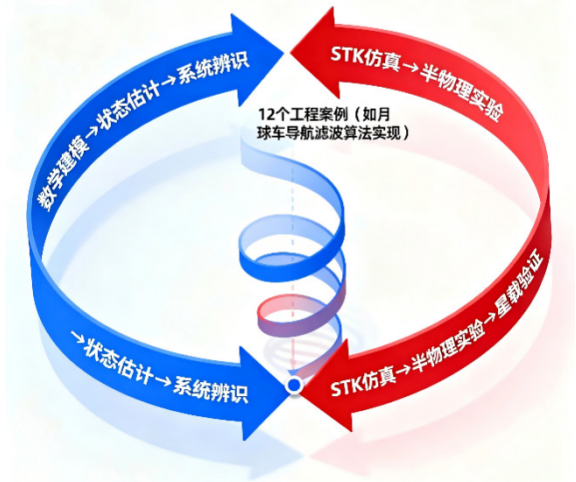


图2 双螺旋课程体系架构图

为了实现从知识到能力的系统性转化，本课程体系构建了“理论螺旋—实践螺旋”双螺旋式教学结构。所谓理论螺旋，是指从数学建模、动力学推导、量测建模、滤波原理到系统级性能分析的连续递进，通过层层深入的方式使学生逐步从“理解原理”走向“掌握系统”。通过这一设计，学生不仅能够深入理解知识，还能够将知识转化为工程能力，实现“学用合一”与“知行并进”。

三、教学模式创新与多元评价体系

（一）分层教学机制

在课程体系构建的基础上，本研究进一步从教学模式与评价

体系两个维度展开系统性创新，以适应深空探测背景下学生能力结构多样化、任务需求复杂化的发展趋势。教学模式的设计强调“差异化培养”与“工程化训练”的深度结合，通过构建分层教学机制、个性化学习路径与项目驱动模式，形成能够充分调动学生主动性、适应不同发展方向的动态培养体系。在评价体系方面，强调对学习过程的真实反映与对能力成果的精准呈现，通过构建覆盖学习全过程、多维度能力指标与行业专家参与的认证体系，实现从知识掌握到工程能力提升的全面评价。

首先，分层教学机制是课程改革的核心环节之一。传统航天器导航课程由于数学基础要求高、算法复杂度大、实验操作难度大，使学生的学习成效极易受个体背景差异影响。为解决这一问题，本课程体系在开课初期通过导航滤波基础测试构建学生能力“基线画像”，依据学生在模型理解、编程实现、滤波调参等方面的表现，形成基础组、进阶组与创新组三个层级的动态分组机

制。（如表2）

其次，在分层机制之上，课程构建了高度灵活的个性化学习路径与项目驱动体系，以进一步激发学生的自主学习与工程创新能力。教学团队结合团队科研成果、真实航天任务案例以及校企合作项目形成覆盖不同主题的任务清单，包括“火星大气进入可观测性分析”“光学导航视觉特征退化补偿”“IMU 噪声建模与在线标定”“地月转移轨道自适应导航”“深空低信噪比测距融合”等多个方向。学生可以根据自身兴趣、擅长领域及未来发展规划选择不同难度与类别的任务，这种模式突破了传统课程中“所有学生做同一实验”的局限，不仅使不同背景的学生都能找到适合自己能力结构的学习任务，还能够让有研究潜力的学生在算法优化、系统仿真和工程集成等方向形成更加具有研究深度和工程价值的成果，实现从“被动学习”向“主动探索”的转变。

表2：分层教学案例对照表

层级	教学内容	案例描述	教学目标	预期成果
基础组	卡尔曼滤波基础	通过“GPS/北斗双模导航”标准化案例，学生掌握卡尔曼滤波的基本原理和应用，学习如何处理卫星导航系统中的数据融合问题。	让学生掌握卡尔曼滤波的基本概念和算法实现，理解导航系统中数据融合的基础。	学生能够使用卡尔曼滤波对导航数据进行滤波，并实现基础导航任务。
进阶层	扩展卡尔曼滤波（EKF）	通过“GPS/北斗双模导航”标准化案例，学生掌握卡尔曼滤波的基本原理和应用，学习如何处理卫星导航系统中的数据融合问题。	学生掌握扩展卡尔曼滤波的实现方法，能够应用于复杂的非线性系统。	学生能够设计和实现扩展卡尔曼滤波算法，解决月球阴影区导航中的数据处理问题。
创新组	无迹卡尔曼滤波与粒子滤波融合	承担“小行星弱引力场导航”课题，学生开发 UKF（无迹卡尔曼滤波）+ 粒子滤波融合算法，解决小行星导航中传感器数据稀疏与精度要求高的问题。	学生通过融合算法提高导航精度，能够应对小行星弱引力场中的挑战。	学生能够设计和实现无迹卡尔曼滤波与粒子滤波融合算法，提高导航精度，并解决弱引力场问题。

（二）多元评价体系

在教学模式创新的基础上，本课程体系构建了以能力发展为核心的多元评价体系，从单一的结果评价模式向“过程评价 + 能力评价”复合模式转型。首先，通过基线测试确定学生起点能力水平，并形成能力雷达图作为后续评价参照；教学过程中通过分阶段测评、仿真实验成绩、算法性能指标与课堂互动情况对学生持续跟踪，形成动态更新的“能力发展矩阵”，直观呈现学生在建模能力、算法能力、系统集成能力、问题解决能力等维度上的提升轨迹。其次，课程强调工程实践真实性，采用项目答辩与代码审查相结合的方式对学生成果进行严格评价。最终项目或课程论文则通过航天院所专家的盲审，以行业标准检验成果质量，确保学生的学习成效可以真正达到工程实践的要求。

整体而言，本章所构建的教学模式与评价体系有效解决了传统工程类课程中“教学同质化、评价单一化”的问题。分层教学实现因材施教，项目驱动促进深度学习，个性化路径激发自主创新，多元评价体系确保能力真实反映，三者形成高度耦合的教学生态，使航天器导航课程能够同时满足基础能力培养、工程能力提升与科研创新能力发展的多元目标，为培养能够适应未来深空探测复杂任务的复合型人才提供了有力支撑。

四、教改成效与未来展望

本课程体系经过数轮迭代建设与持续投入，已经在学生能力提升、课程资源建设和人才培养模式创新等方面取得显著成效，其教育影响力也在航天类高校中逐步扩散。首先，从学生能力发展层面来看，课程改革显著改善了传统教学模式下理论与实践脱节的问题，使学生在工程实践与自主创新方面的综合能力得到全面提升。改革实施后，学生在卫星导航算法开发与验证平台中的综合评分达到92.3分，显著高于改革前的平均水平；多名学生依托课程项目完成的滤波算法和导航系统原型在校企联合评测中表现优异，在真实工程数据集上的定位精度相比传统课程项目提升了20%—40%。更重要的是，课程的项目化实践模式促使学生主动进行算法改进与工程优化，使其在全国性科创竞赛中取得突出成绩，包括“挑战杯”“互联网+”等赛事的一等奖3项、二等奖5项，充分体现了课程体系对学生创新能力的实质性促进作用。

在课程建设方面，课程团队基于改革成果构建了覆盖理论课程、仿真实验、半物理平台与任务案例的完整资源体系，并成功入选教育部首批“虚拟教研室建设试点”以及国家智慧教育平台的优质课程。课程的教学资源被多所高校共享与应用，部分实验

模块被纳入企业培训体系，实现了校内外教育资源的双向流动。

在课程改革的成果逐步显现的同时，该体系也展现出较强的通用性和可迁移性。从体系架构与教学模式来看，“科教融合—校企协同—虚实结合”的核心理念不仅适用于航天器导航领域，也能够为航空航天工程、飞行器控制、智能系统工程等领域提供参考。课程中构建的双螺旋式知识—实践结构、分层教学与个性化路径相结合的培养模式、多元能力评价体系等，都具有可重构

与可扩展的特征，可根据不同学科和行业需求进行适配。特别是在高等工程教育普遍面临内容更新滞后、工程场景缺乏、评价体系单一等问题的大背景下，本研究提出的以真实任务驱动学习、以工程平台支撑能力培养、以数据化工具实现过程评价的整体方案，为新时代工程教育范式改革提供了可借鉴的经验。

参考文献

[1] 国务院.《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2021—2035年）》.北京：国务院公报，2021.

[2] 国家空间科学中长期发展规划（2024—2050年）[R].中国科学院；中国载人航天工程办公室；国家航天局，2024-10-15.

[3] 国家深空探测战略可持续发展需求：行星科学研究 [R]. 国家自然科学基金委员会交叉科学部，2021.

[4] 国务院新闻办公室. 2021 中国的航天 [EB/OL]. 北京：国务院新闻办公室，2021. [2025-12-10].

[5] 国家自然科学基金委员会. 2024 年度“月球与深空探测科学研究（二）”专项项目指南 [R]. 国家自然科学基金委员会，2024.

[6] 国家航天局. 世界深空探测发展态势及展望 [R]. 国家航天局，2015. [2025-12-10].

[7] 教育部高等教育司. 新工科研究与实践项目指南 [R]. 北京：教育部，2020.