

航天器相对运动的教学设计与思政实践¹⁾

祁 瑞²⁾

(北京理工大学宇航学院, 北京 100081)

摘要 航天器相对运动研究两个及以上航天器在太空中相对彼此的运动特性, 在空间交会对接和空间站建设运营等领域有着广泛的应用。相对运动的教学工作面临理论公式繁多、运动特性反直觉、思政案例难设计等挑战。课程负责人设计了“历史背景—基础理论—思想实验—课堂讨论—编程实践—工程案例”的教学流程和方法, 并在其中穿插融入了人类交会对接成就史和月球采样返回的中国方案等思政案例。教学实践表明, 该教学和思政设计能有效提升学生的学习成效, 使得思想政治教育与专业知识教育相辅相成。

关键词 航空航天, 航天器, 轨道动力学, 相对运动, 课程思政

中图分类号: G642.0 文献标识码: A doi: [10.6052/1000-0879-23-523](https://doi.org/10.6052/1000-0879-23-523)

DESIGN OF TEACHING AND PRACTICE OF IDEOLOGICAL AND POLITICAL EDUCATION FOR SPACECRAFT RELATIVE MOTION¹⁾

QI Rui²⁾

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Spacecraft relative motion studies the motion characteristics of two or more spacecraft relative to each other, which has extensive applications in fields such as space rendezvous and docking and space station construction and operation. The teaching of relative motion faces challenges such as numerous theoretical formulas, counter-intuitive motion characteristics, and difficulty in designing ideological and political education cases. The course instructor designed a teaching process and method of “historical background, basic theory, thought experiment, in class discussion, programming practice, engineering cases”, and interspersed it with ideological and political education cases such as the history of rendezvous and docking achievements and the China’s new scheme for lunar sample return. Teaching practice has shown that this design of teaching and ideological and political education can effectively improve students’ learning performance, achieving an effect of mutual promotion and supplementation between ideological and political education and professional knowledge education.

Keywords aerospace, spacecraft, orbital dynamics, relative motion, curriculum-based ideological and political education

航天器轨道动力学是航天专业的一门基础核心课程, 对于航天专业创新人才的培养发挥着十分重要的作用^[1]。航天器相对运动是轨道动力学的重要分支, 研究两个及以上航天器在太空中相

对彼此的运动特性, 是单颗卫星轨道运动理论的进一步延伸, 在空间交会对接、编队飞行、在轨服务、空间站建设和卫星集群等领域有着广泛的应用, 是航天专业研究生需要熟练掌握和灵活运

2023-10-13 收到第 1 稿, 2023-12-10 收到修改稿。

1) 北京市高等教育学会 2022 年面上课题 (MS2022044) 和北京理工大学 2022 年研究生课程类综合改革项目 (2022ALJX001) 资助。

2) 祁瑞, 博士, 副教授, 研究方向为航天动力学与控制。E-mail: qirui@bit.edu.cn

引用格式: 祁瑞. 航天器相对运动的教学设计与思政实践. 力学与实践, 2024, 46(3): 636-642

Qi Rui. Design of teaching and practice of ideological and political education for spacecraft relative motion. *Mechanics in Engineering*, 2024, 46(3): 636-642

用的基本理论和知识。

航天器相对运动的教学面临较大挑战。一方面,航天器相对运动理论公式繁多,在惯性系和当地铅锤、当地水平系(local vertical/local horizontal frame, LVLH)两个坐标系下,分别牵涉非线性和线性的动力学方程,根据参考轨道为圆轨道和椭圆轨道,又牵带出C-W(Clohessy-Wiltshire)方程、Lawden方程和T-H(Tschauner-Hempel)方程等。这些方程形式复杂、关系纷繁,结果规律往往与直觉相悖,对学生的数理推演能力、逻辑思维能力和空间想象能力要求较高,容易让学生产生畏难情绪,影响学习效果。另一方面,虽然中国航天重大工程的历史成就为航天专业教育教学提供了极为丰富的思政案例,但航天工程因其工作神秘、约束繁多等特点,与校内讲授的理论知识还有一定距离,特别是与公式繁多的授课内容难以找到恰当的融入点,容易导致课程思政教学流于形式、脱离实际、照本宣科,难以产生润物无声的育人效果。

近年来,许多教师对轨道动力学的教育教学和课程思政开展了研究。郝晓宁等^[2-3]构建了跨学院(学科)的航天器轨道理论与应用教材和课程体系,形成了教材建设、教学实践和教学质量间互相促进的良性循环;介绍了在轨道动力学课堂讲授和作业实践中所采用的互动教学法。张汉清等^[4]将科学计算软件Mathematica引入教学,为学生理解掌握轨道动力学概念提供了可视化和交互功能。杨洪伟等^[5]采用问题导向式教学法,让学生在动手实践中学习轨道动力学理论知识。罗亚中等^[6]在长期指导学生参加国际和国内轨道设计竞赛的实践中,探索出一套研究生创新培养模式,取得了显著的人才培养成效。张刚等^[7]以航天精神、名人名言、重大航天工程、工程伦理和唯物辩证法等为思政元素,设计了与轨道动力学知识内容紧密结合的思政案例。闫晓东等^[8]以“航天飞行动力学”课程为例,介绍了在思政元素挖掘、课程体系重构、授课模式改革和项目案例提炼等方面的多项举措。张学阳等^[9]以“弹道与轨道基础”课程为例,介绍了团队建设、思政设计和思政案例等实践举措,探讨了航天专业课程思政的实施方法。在航天器相对运动讲授方面,王伟林等^[10]

介绍了航天工程大学课程组提出的演示法、交互法和实验法,并将其有机结合形成了体系化教学方法。本文则设计了一套与之不同的教学方法,并且融入了思政案例,可与该论文形成补充。

在北京理工大学“航天器轨道动力学”课程讲授过程中,课程负责人依托线下教学经验和线上慕课资源,对相对运动的教学方法和内容设计开展了研究与实践。在知识传授层面,通过帮助学生梳理各个相对运动方程之间的逻辑递进关系,以及设计帮助学生理解违反直觉的相对运动特性的“在太空扔小球”思想实验,使学生夯实专业基础、具备专业素养;在能力培养层面,采用翻转课堂和线上线下混合式教学等方法手段,设计需要学生借助编程和演示工具协同开展的课堂实践,使学生养成实践编程能力、团队协作能力和汇报演示能力;在价值塑造层面,以中国航天重大工程成就为素材,设计融入了紧密结合理论知识点、紧跟世界航天发展前沿、弘扬中国航天精神的思政案例,使思想政治教育与专业知识教育水乳交融、相得益彰,实现立德树人的育人目标。

下面,将对航天器相对运动的教学设计与思政实践做详细总结和展示。

1 教学设计

航天器相对运动的教学设计由6部分组成,即历史背景、基础理论、思想实验、课堂讨论、编程实践和工程案例。其中,在历史背景中,介绍双子星4号宇航员首次尝试空间交会失败的故事,激发学生的求知欲;在基础理论中,介绍相对运动涉及的动力学方程及相互关系,重点介绍C-W方程及其解析解;在思想实验中,介绍在太空中朝不同方向扔小球的有趣实验,并求解分析小球的相对运动轨迹;在课堂讨论中,提出航天员是否敢在舱外不系安全绳向上跳跃的问题,鼓励学生参与课堂讨论,启发学生关注C-W方程的局限性;在编程实践中,要求学生分组完成扔小球的编程仿真和结果分析,并上讲台做PPT演示汇报;在工程案例中,展示神舟飞船或天舟飞船与空间站的交会对接轨迹与扔小球轨迹的相似点,并以中国航天交会对接成就的思政教育收尾。

1.1 历史背景

空间中的相对运动特性与地面上的完全不同。在地面上要驾驶汽车与某一目标会和时,只需握住方向盘,朝着目标踩下油门即可。但是,在空间中,交会却是违反这一直觉的,这也直接导致了人类首次空间交会尝试的失败。当时,双子星4号宇航员试图驾驶飞船去接近泰坦2号运载火箭的上面级,当他对准目标点火助推后,他惊奇的发现自己非但没有接近目标,反而向后向下远离目标。他尝试了很多次都未能取得成功,在消耗了将近一半燃料后不得不放弃。

教学内容以这个历史故事为开头,让学生既感到新奇,又感到困惑,激发出了他们对相对运动理论的求知探索欲。

1.2 基础理论

描述相对运动的动力学方程有很多,有惯性系和 LVLH 系下的非线性方程和线化方程,有适用于圆参考轨道的 C-W 方程,以及适用于椭圆

参考轨道的 Lawden 方程和 T-H 方程等。课程负责人给学生展示了这些方程的详细推导细节,并给出了 C-W 方程的求解过程和解析解。T-H 方程的解析解则在 2002 年由 Yamanaka K 和 Ankersen F 两位学者给出^[11],课程负责人对此也做了拓展介绍,以提升课程创新性和高阶性。为了方便学生厘清这些方程之间的关系,并正确使用它们解决实际问题,课程负责人介绍了我国著名数学家、中国科学院院士华罗庚先生的学习方法。华罗庚先生没有接受过正规大学教育,是完全依靠自学来学习数学的。他将自己的学习方法总结为一句话:“读书,要先把书读厚,再把书读薄”。把书读厚是积累知识、补充细节的过程。给学生展示方程推导的细节,其实就是把书读厚的过程。把书读薄是提炼概括、化繁为简的过程。课程负责人带领学生绘制了一幅树状图(图1),揭示出相对运动各动力学方程之间的逻辑关系,便于学生轻松记忆。这其实就是把书读薄的过程。

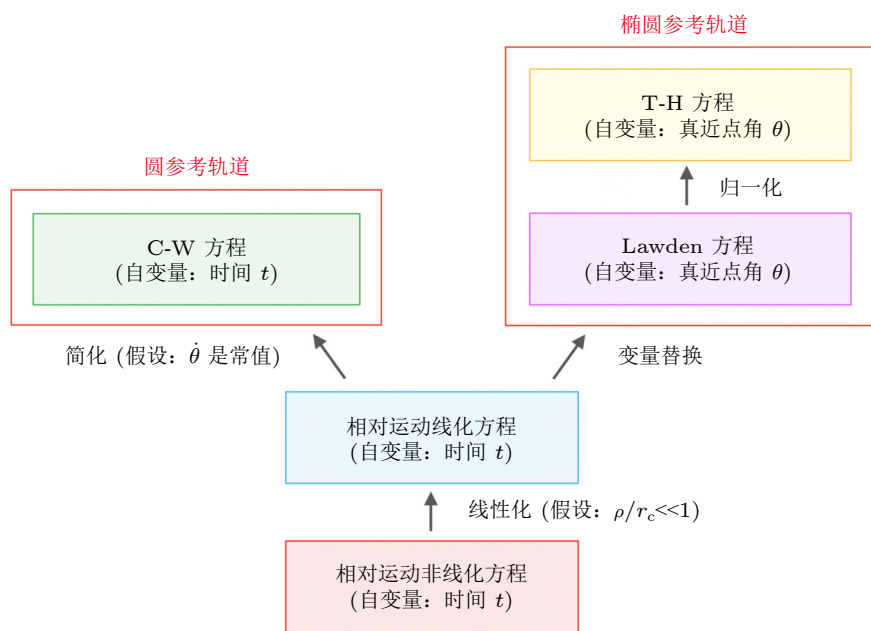


图1 相对运动动力学方程树状图

1.3 思想实验

树状图能帮助学生记住动力学方程,但如何记住动力学方程解的特性呢?由于相对运动特性是反直觉的,记住它们并非易事。为此,课程负责人采用了航天动力学与控制领域专家 Arun Misra 教授在麦吉尔大学“航天器动力学”一课中

所设计的在太空中朝不同方向扔小球的教学案例,并做了细化和创新。以向上扔小球为分析重点(图2),带领学生借助 C-W 方程推导小球相对运动的轨迹方程,绘制小球的运动轨迹,判断运动方向和周期,指出小球是沿椭圆轨迹向后运动的,而非像在地面上一样直上直下,并给予解释。

小球在 LVLH 坐标系的原点处被主星以 $\dot{x}_0$ 的速度沿 x 轴正向向上抛出：

$$x_0 = y_0 = z_0 = 0 \quad \dot{y}_0 = \dot{z}_0 = 0 \quad \dot{x}_0 > 0$$

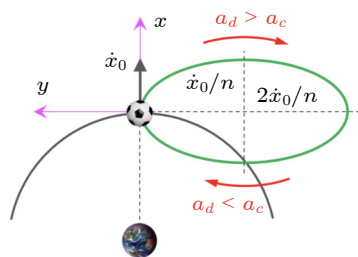
将以上初始条件代入 C-W 方程的解析解：

$$x(t) = \frac{\dot{x}_0}{n} \sin(nt)$$

$$y(t) = \frac{2\dot{x}_0}{n} [\cos(nt) - 1]$$

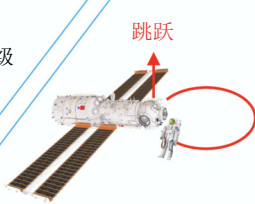
椭圆轨迹

$$\left(\frac{x}{\dot{x}_0/n}\right)^2 + \left(\frac{y}{2\dot{x}_0/n} + 1\right)^2 = 1$$



“英雄航天员”刘伯明

- 中国人民解放军航天员大队特级航天员，正师职，少将军衔
- 入选神舟 7 号和 12 号飞行乘组，执行出舱任务
- 北理工 2018 级博士生



你是否敢在舱外不系安全绳向上跳跃？



不考虑摄动因素的影响



核心舱有轨道姿态控制



跳跃方向精准、无偏差



留守航天员未开走飞船

图 2 在太空中向上扔小球

1.4 课堂讨论

“既然向上扔出的小球能沿椭圆轨迹返回出发点，那站在舱外向上跳跃的航天员也应该能沿椭圆轨迹返回太空舱。如果你是航天员，你敢不系安全绳向上跳跃吗？”课程负责人通过这个问题组织学生参与课堂讨论，要求学生给出自己的答案并作解释。在讨论完毕、学生做好选择后，课程负责人借助理论解释和数值仿真公布答案：C-W 方程是线化方程，真实情况中非线性的存在使轨迹不再是封闭椭圆，而是向后漂移的类椭圆螺旋线。通过课堂讨论，使学生意识到非线性效应，启发学生关注到 C-W 方程的局限性。同时，通过对比“线化方程有解析解，但只适用于近距离的相对运动”和“非线性方程没有解析解，但适用于大范围相对运动”，引导学生结合专业知识思考马克思唯物辩证法中对立统一的辩证关系。

1.5 编程实践

在介绍完向上扔小球的思想实验后，课程负责人会要求学生分组协作，研究向下、向前、向后、向左和向右扔小球的相对运动轨迹，总结规律、分析原因，并通过软件编程来数值仿真非线性对相对运动轨迹的影响。课程负责人会预留时间给学生，让他们做 PPT 汇报演示，展示自己的实践成果。部分学生能够取得超出预期的结果。例如，有学生采用了大尺度仿真时间，发现向前扔出的小球不是像 C-W 方程预测的那样持续向后漂移，而是绕行地球一圈回到初始位置附近，

这一现象直观揭示出 C-W 方程解析解 y 轴分量中的漂移项实际上就是线性化导致的。编程实践不仅检验了理论学习成效，锻炼了算法编制能力，还通过小组汇报演示锻炼了学生口才表达和演示设计等能力。

1.6 工程案例

理论学习的最终目标是指导工程实践。因此，在相对运动教学内容的最后，课程负责人以中国空间站建设与运营为例，介绍了 R-bar, V-bar 和 H-bar 等不同交会对接方式及各自的优缺点，特别展示了神舟飞船或天舟飞船与空间站交会对接轨迹的两种设计方案（图 3），并启发学生注意到方案 1 轨迹与向下扔小球轨迹的相似点，方案 2 轨迹与向后扔小球轨迹的相似点。特别地，课程负责人还组织学生讨论哪种方案更好，引导学生建立空间安全意识。设想飞船在抵近空间站过程中控制系统突然失效。在方案 1 中，飞船会停止前行，沿椭圆轨迹在原地徘徊。而在方案 2 中，飞船会继续前行并撞向空间站。因此，出于安全考虑，第 1 种方案更受青睐。

2 思政实践

交会对接被比喻为“万里穿针”，是载人航天活动的三大基本技术之一，也是相对运动理论在航天工程中的最直接应用。课程负责人基于全世界特别是中国在交会对接技术上所取得的辉煌成就，设计融入了 4 个与相对运动教学内容紧密相

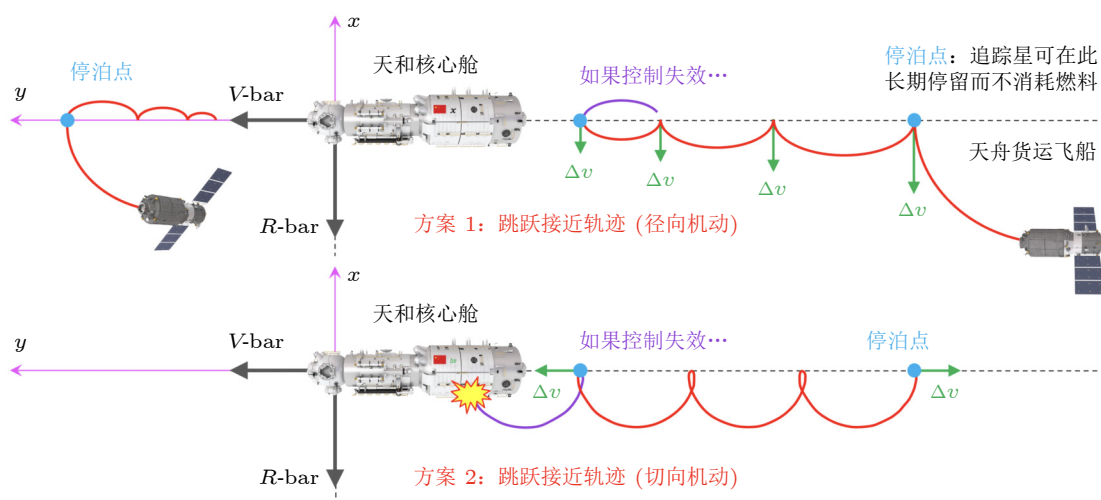


图3 飞船与空间站交会对接轨迹的设计方案

关的思政案例。

2.1 人类交会对接成就

课程负责人在介绍了双子星4号空间交会的失败尝试后立刻指出,失败并不可怕,它是成功的必经之路。虽然该尝试以失败告终,但它对轨道动力学的理论发展起到了重要推动作用,也为人类后续取得空间交会的成功奠定了基础。课程负责人进而介绍了美国实现的世界首次手动交会对接,以及苏联实现的世界首次自动无人交会对接,特别介绍了中国载人航天三步走发展战略和我国在交会对接领域所取得的重大技术突破,让学生明白核心技术是要不来的,是换不来的,是买不来的,也是等不来的!让学生看到,中国航天人自力更生、攻坚克难,铸就了伟大的载人航天精神。他们特别能吃苦,担负起国家赋予的神圣使命;他们特别能战斗,彰显出自强不息的民族精神;他们特别能攻关,铸就了惊艳世界的大国重器;他们特别能奉献,实现着华夏儿女的飞天梦想。

2.2 月球采样返回的中国方案

在讲解历史背景时,课程负责人也介绍了相对运动在航天工程中的若干应用,其中就提到了月球采样返回的中国方案。在20世纪,月球采样返回只有两种方案。一是美国方案,宇航员操控航天器在月球轨道上进行手动交会对接,实现月球样品的转移;另一种是苏联方案,航天器从月面起飞后不进行交会对接和样品转移,直接飞

回地球。在2020年,我国的嫦娥五号展示了中国方案:在月球轨道实施自动交会对接和无人样品转移。在距离地球38万千米的月球轨道上实施无人交会对接,其难点在于,月球轨道上没有导航卫星提供服务,光照环境复杂而未知,来自地面站的支持也非常有限。中国航天人没有畏惧退缩,反而迎难而上,创造了这个世界航天史上的“第一次”。

2.3 北京理工大学的英雄航天员

课程负责人在组织学生开展关于航天员不系安全绳跳跃的课堂讨论时,介绍了我校博士生、英雄航天员刘伯明(图2)。他执行了神舟7号和12号两次飞行任务,是天和核心舱的首批入住人员,并成功完成了出舱活动和舱外作业。通过介绍让学生产生荣誉感和自豪感,让学生感觉航天英雄就在身边,并感悟伟大的航天精神。

2.4 径向交会对接

课程负责人在介绍完前向和后向交会对接后,介绍了径向交会对接,并指出径向交会对接在姿轨精准控制、竖飞天地通信和相对状态确定等方面的技术难度(图4)。我国在2021年掌握该技术。当年10月16日,神舟13号与天和核心舱携手完成了径向交会对接的完美首秀。在课堂上,学生看到了中国交会对接技术所经历的从自控到手控、从常规到快速、从近地到近月、从切向到径向的渐进式发展,看到了中国航天人所走出的一条中国特色自主创新发展的道路。

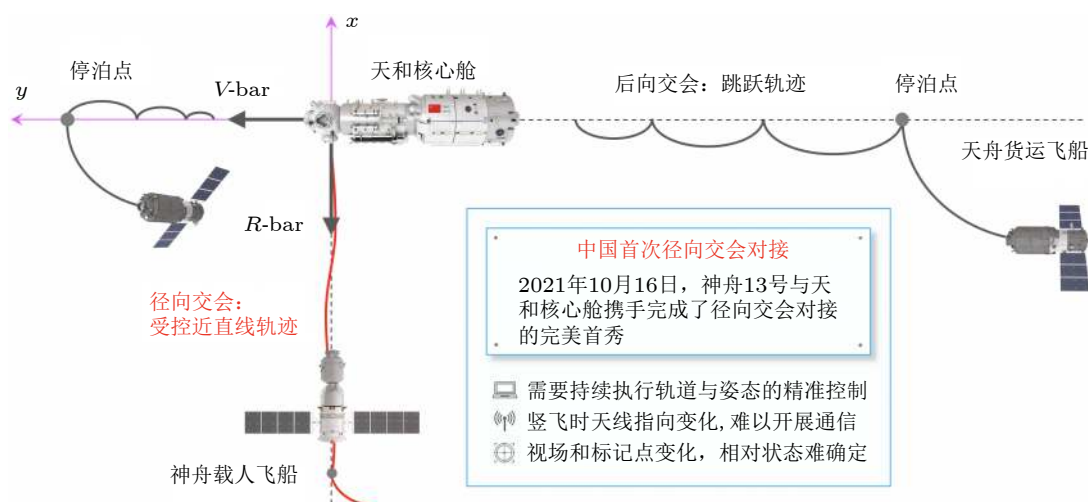


图 4 径向交会对接思政案例设计

3 结论

在航天器相对运动教学实践中, 通过精心的教学方法设计, 学生厘清了纷繁公式背后的关系与线索, 轻松记住了违反直觉的相对运动特性, 并在绳系卫星释放、空间碎片主动清除、航天器追逃抵近等前沿热点问题的研究中实现应用。通过精心的思政案例设计, 学生深度了解了中国航天的历史发展和辉煌成就, 树立起新时代青年正确的人生观、世界观和价值观, 增强了民族自信心和自豪感, 激发出爱国热情 and 家国情怀。教学工作受到学生的广泛好评, 评教分数长期保持在 95 分左右。

目前, 包括相对运动在内的航天器轨道动力学理论知识已随“航天器轨道动力学”慕课在“学堂在线”平台上线, 面向全社会免费开放。该慕课已入选教育部在线教育研究中心 2023“拓金计划”第三批示范课程, 相关数字化教学素材可推广应用于兄弟院校航天专业的教学实践, 也可对其他航天专业课程开展思政融入设计提供有益的参考。

参 考 文 献

- 1 党朝辉. 航天器轨道动力学之“动”在何处? 力学与实践, 2018, 40(2): 236-239
Dang Zhaohui. Why we talk of dynamics of a spacecraft orbit besides its kinematics? *Mechanics in Engineering*, 2018, 40(2): 236-239 (in Chinese)
- 2 郗晓宁, 王威, 高玉东等. 适应航天技术发展需求, 建设多层次航天器轨道理论与应用系列课程. 高等教育研究学报, 2009, 32(1): 57-59
Xi Xiaoning, Wang Wei, Gao Yudong, et al. The establishment of series courses of spacecraft orbit theory and application according to the requirements of the development of space technology. *Journal of Higher Education Research*, 2009, 32(1): 57-59 (in Chinese)
- 3 郗晓宁, 王威. 本科生课程教学中的互动——“航天器轨道力学基础”课程教学法简述. 高等教育研究学报, 2010, 33(1): 82-84
Xi Xiaoning, Wang Wei. On interaction in teaching undergraduate course —— teaching methods of fundamentals of spacecraft orbit dynamics. *Journal of Higher Education Research*, 2010, 33(1): 82-84 (in Chinese)
- 4 张汉清, 周芳. 基于 Mathematica 的航天器轨道理论可视化教学. 大学教育, 2019(5): 107-109
- 5 杨洪伟, 李爽. 轨道力学问题导向式教学培养轨道设计能力的实践. 力学与实践, 2021, 43(2): 268-272
Yang Hongwei, Li Shuang. The practice of training the ability of orbit design by problem-oriented teaching for orbital mechanics. *Mechanics in Engineering*, 2021, 43(2): 268-272 (in Chinese)
- 6 罗亚中, 李俊峰, 高扬等. 基于“专家型”竞赛的航天创新人才培养模式与实践. 力学与实践, 2021, 43(2): 262-267
Luo Yazhong, Li Junfeng, Gao Yang, et al. Cultivation of innovative talents in aerospace based on “expert type” competition. *Mechanics in Engineering*, 2021, 43(2): 262-267 (in Chinese)
- 7 张刚, 霍明英, 邱实等. “航天器轨道动力学”课程思政的改革与实践. 第三届全国航空航天类课程思政教学改革论坛, 西安, 2022
- 8 闫晓东, 方群. 新时代背景下“航天飞行动力学”课程思政建设与实践. 第三届全国航空航天类课程思政教学改革论坛, 西安, 2022
- 9 张学阳, 张雅声, 王训等. 弹道与轨道基础课程思政探索与实践.

- 高教学刊, 2022(8): 88-92
- 10 王伟林, 宋旭民, 柴华等. 航天器相对运动动力学教学研究与实践. 力学与实践, 2022, 44(2): 434-442
- Wang Weilin, Song Xumin, Chai Hua, et al. Teaching research and study for spacecraft relative motion dynamics. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(2): 434-442 (in Chinese)
- 11 Yamanaka K, Ankersen F. New state transition matrix for relative motion on an arbitrary elliptical orbit. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2002, 25(1): 60-66

(责任编辑: 郭丽雅)