

基于时变优化函数的多无人艇轨迹跟踪控制

何宇婷, 李孟轩, 罗俊元, 李睿宇, 陈美霖

广东理工学院, 广东 肇庆 526000

DOI: 10.61369/ETR.2025470049

摘要 : 随着无人艇技术的快速发展, 其在海洋探测和安防巡逻等领域受到了广泛的应用。因此在当前的教育教学体系中多无人艇协同控制已经成为相关专业人才培养的核心内容之一, 而以实变优化函数为基础的轨迹跟踪控制作为多无人艇协同控制的关键技术, 其教学质量会直接影响到学生对复杂控制理论的理解与应用能力。本文主要从基于时变优化函数的多无人艇轨迹跟踪控制教学的现状入手, 深入分析了基于时变优化函数的多无人艇轨迹跟踪控制教学的重要性, 并对基于时变优化函数的多无人艇轨迹跟踪控制理论教学体系构建方式进行了探讨, 希望能够帮助学生掌握实践优化函数与多无人艇轨迹跟踪控制的融合方式, 从而不断提升他们对于复杂工程问题的分析和解决能力, 为相关领域输出更多高素质技术人才。

关键词 : 时变优化函数; 多无人艇; 轨迹跟踪控制

Trajectory Tracking Control of Multiple Unmanned Surface Vessels Based on Time-Varying Optimization Functions

He Yuting, Li Mengxuan, Luo Junyuan, Li Ruiyu, Chen Meilin

Guangdong Polytechnic College, Zhaoqing, Guangdong 526000

Abstract : With the rapid development of unmanned surface vessel (USV) technology, it has been widely applied in fields such as marine exploration and security patrol. Therefore, in the current education and teaching system, the cooperative control of multiple USVs has become one of the core contents in the training of professionals in related fields. As a key technology for the cooperative control of multiple USVs, trajectory tracking control based on time-varying optimization functions directly affects students' understanding and application capabilities of complex control theories. Starting from the current situation of teaching trajectory tracking control of multiple USVs based on time-varying optimization functions, this paper deeply analyzes the importance of this teaching, and discusses the construction method of the theoretical teaching system for it. It is hoped to help students master the integration method of practical optimization functions and trajectory tracking control of multiple USVs, thereby continuously improving their abilities to analyze and solve complex engineering problems, and outputting more high-quality technical talents for related fields.

Keywords : time-varying optimization functions; multiple unmanned surface vessels; trajectory tracking control

引言

当前智能制造与海洋工程技术正在快速发展, 在这一背景下, 无人艇技术凭借其灵活性和安全性较高的优势, 已经成为海洋领域技术创新的重要方向, 而多无人艇协同作业因为能够提升任务效率, 并且有效拓展作业范围, 已经逐渐成为行业应用的主流形式。而以时变优化函数为基础的多无人艇轨迹跟踪技术, 可以根据环境的变化情况以及任务的需求状态来进行动态调整, 从而实现多无人艇的精准轨迹跟踪, 是能够保障多无人艇高效作业的核心技术^[1]。因此对于开设相关专业的院校而言, 该技术的教学是衔接理论知识与行业应用的关键环节, 不仅可以帮助学生深化自身对于自动控制原理和优化算法等基础理论的理解, 还能够有效培养学生将时变优化思想应用到负载工程场景的能力。

一、基于时变优化函数的多无人艇轨迹跟踪控制技术研究进展

(一) 核心技术原理架构

无人艇动力学与运动学特性是多无人艇轨迹跟踪控制的基

础, 核心在于能够通过动态化的机制来适配复杂海洋环境与协同作业的需求。时变优化函数能够通过引入时间维度的方式来动态调整相关逻辑, 以此来构建局部与全局双层优化的目标, 从而实现控制策略的实时匹配。而局部代价函数的重点在单艇跟踪精度与能耗控制上, 全局代价函数的主要目标会放在综合多艇协同约

束上，包含保持队形、避风要求和通讯通信等关键指标。分布式协同控制架构是技术实施的核心支撑，通过图论模型能够描述艇之间的信息交互关系，以局部信息共享的方式来实现全局最优轨迹求解。这种方式也能够有效避免集中控制对于通讯带宽的高依赖性，从而有效提升系统扩展性和抗干扰能力^[2]。

（二）关键技术创新方向

在优化分布式算法方面，需要突破传统时不变假设的局限，将势能函数与一致性协议进行融合，从而设计出了分布式的时变优化器。通过势能函数的合理构造，能够有效保证无人艇之间保持期望的距离，避免碰撞并维持稳定的通讯连接状态。而一致性协议可以实现多艇速度与位置的协同收敛，从而支持快速追踪动态变化的全局最优轨迹。在具有不确定性的处理领域中，需要摒弃计算复杂的神经网络方法，转而采用渐近扩张状态观测器技术，通过这种方式来直接观测海洋环境扰动以及模型参数设定等不确定性因素并做到实时补偿，使观测误差能够最大化减小，从而显著提升控制鲁棒性^[3]。在控制率设计方面，可以结合反步法来将高阶非线性系统分解为低阶子系统，从而推动逐步构造出虚拟控制率与实际控制率，充分融合实践优化目标与协同约束，从而实现轨迹跟踪误差的稳定收敛。

（三）技术应用优势特征

与传统的控制技术相比，这一新型的技术具有显著的优势。比如动态适配性强，能够根据环境干扰和任务切换等需求来实施调整优化目标与控制策略，从而有效应对复杂的海洋环境时变性。同时分布式架构也非常高效可靠。通过局部信息交互可以实现全局协同，以此来有效降低通讯的开销，增强系统抗个体失效能力。^[4]

二、基于时变优化函数的多无人艇轨迹跟踪控制的行业应用核心价值及教学意义

（一）行业应用核心价值

这一技术已经成为当前海洋工程领域的关键支撑技术，在海洋探测过程中能够实现探测轨迹的精准跟踪，同时还能做到动态优化相应的队形，大幅提升了区域覆盖效率。在安防巡逻场景中，通过时变优化函数可以实时调整巡逻路径，可以有效应对复杂海域中存在的动态威胁。在应急救援领域，能够助力多无人艇协同追踪救援目标，并优化相应的规划路线，最大程度上提升救援响应速度。

（二）教学实践重要意义

在人才培养层面。该技术能够将控制理论、运筹学、船舶动力学等多个学科知识进行衔接，能够有效打破学科之间存在的限制并培养学生的跨学科思维与解决复杂工程问题的能力。在当前的相关专业教学中该技术的确很容易导致人才培养与行业需求脱节现象的发生，构建系统化的教学体系已经成为十分紧迫的任务。通过重构教学体系并优化教学方法，能够帮助学生掌握时变优化思想与分布式协同控制之间存在的联系，提升他们在海洋工程智能控制领域的核心竞争力。

三、基于时变优化函数的多无人艇轨迹跟踪控制理论教学体系构建

（一）教学内容分层设计，构建系统化知识框架

在面对以时变优化函数为基础的多无人艇轨迹跟踪控制理论时，学生的学习难度会比较大，因此在设计相关教学内容时，教师需要引导学生循序渐进地掌握知识，对教学内容按照基础层、核心层以及拓展层等不同难度来进行分层设计，一起来构建出一个更加系统化的知识框架^[5]。具体来说，基础层的教学内容主要放在理论铺垫上，旨在帮助学生对相关知识内容建立学习基础。这一层次的内容可以包括两个部分，一部分是时变优化函数基础，重点为学生讲解实验优化函数的定义、数学特征以及常见类型和基本求解方法等，通过理论讲解和简单数学推导的方式来让学生理解时变优化函数的核心要素以及基本原理。另一部分则是多无人艇轨迹跟踪基础，向学生讲解与多无人艇相关的运动学与动力学模型、轨迹跟踪的基本概念、单无人艇轨迹跟踪的经典控制算法等，以此来让学生熟悉多无人艇的运动特性^[6]。通过这些基础内容的教学，能够为学生后续深入学习相关知识和操作技能打下扎实的基础。在核心层的教学上，教师需要将重点放在融合应用上，这也是理论教学的核心内容。这一层的教学主要围绕时变优化函数如何赋能多无人艇轨迹跟踪控制来展开，教学内容包括多无人艇轨迹跟踪的实变需求分析，比如环境干扰所导致的跟踪精度波动，以及任务切换可能引发的控制目标变化等，让学生能够深入理解时变优化函数在其中所起到的重要作用。同时也需要向学生讲解时变优化函数在多无人艇轨迹跟踪中的设计原则，包括函数需求匹配多无人艇动态特征、满足轨迹跟踪精度要求以及兼顾多艇协同约束等方面的内容，以此来引导学生更加顺利地掌握函数设计的核心方式^[7]。最后在拓展层，应当将教学目标放在发展前沿和应用上，主要目的是拓宽学生的学习视野。

（二）教学方法创新，提升学生学习主动性

当前关于多无人艇轨迹跟踪技术的教学具有理论性强、逻辑复杂的特点，因此在实际教学过程中，教师需要创新现有的教学方法，将传统以教师讲授为主，学生被动接收的教学模式进行优化，从而不断提升学生的学习主动性和参与度^[8]。一方面就是可以采用问题导向式的教学方法，通过在课前向学生提出实际问题来引导他们进行主动探究。在教学过程中，教师需要围绕多无人艇轨迹跟踪控制的实际需求来提出本堂课程的核心问题，比如当多无人艇在复杂海域执行任务时，环境干扰导致跟踪误差增大，如何通过时变优化函数调整控制参数以保证跟踪精度？等，让学生在课堂开始后能够带着问题学习。同时通过引导学生自主分析问题、查阅资料并进行小组讨论，使他们能够在推导的过程中了解时变优化函数的设计思路以及控制模型的构建方法，学生能够在这个过程中形成自身特有的问题解决方案^[9]。这种教学方法能够有效激发出学生的探索兴趣，使他们能够在学习过程中不断深化对知识的理解，从而有效培养他们分析问题和解决问题的能力。另外也可以结合可视化教学法，运用先进的技术工具来将抽象知识进行直观展示。比如教师可以采用 MATLAB、Python 等软件构

建可视化教学模型，借助动态仿真功能来展示时变优化函数的参数变化过程和多无人艇轨迹跟踪的实时调整效果。比如通过动画可以使学生更加直观的观察到在不同时变权重系数下，多无人艇跟踪误差的变化曲线和轨迹调整路径，使他们能够亲身体验到参数调整之后，控制指令的变化趋势，以及这种变化对多无人艇轨迹的优化程度，通过对比仿真的方式可以突出时变优化函数的应用优势。此外，还可以利用思维导图和流程图等工具来为学生实时梳理时变优化函数的设计步骤以及控制模型的构建流程，使学生能够更加清楚地了解知识背后存在的逻辑关系，形成系统化的认知。

（三）教学评价多元设计，全面反映学习效果

在整个教育教学体系中，传统以考试为核心的单一评价方式很难全面反映出学生的整体学习效果。因此需要构建一个更加多元化的教学评价体系，从多个角度来对学生的学习状态进行评价，使他们能够更加重视自身的学习过程和能力培养。在评价内容上，需要将理论知识和运用能力进行综合性评价。理论知识评价重点需要放在学生对时变优化函数基础理论、多无人艇轨迹跟踪核心概念以及控制模型构建逻辑的掌握程度上，通过课堂提问、课后作业和单元测试等多种方式进行，以此来更加全面地检验学生对于理论知识的掌握程度。应用能力方面的评价则需要关注学生运用知识解决实际问题的能力，通过为学生设计综合性的任务来判断他们的掌握程度^[10]。比如可以给定多无人艇协同避

障场景来要求学生对此设计识别优化函数和构建控制方案，以此来评价学生的需求分析能力、方案设计能力和逻辑分析能力，而并不是单纯地考察他们的知识记忆情况。最后在评价主体上可以将教师评价与学生评价进行融合。教师评价主要的核心，根据学生的课堂表现、作业完成情况以及任务成果等方面进行综合性打分。并为学生出具专业的评价意见，使他们能够及时调整自身未来的学习方法。学生评价可以引入学生自评和互评，通过自评反思，自己在学习过程中存在的优势和不足，可以使他们明确认识到自身技能掌握的薄弱项目，对于他们后续的优化调整有十分积极的作用。而同伴互评可以以小组为单位，需要成员从多个角度对同伴进行评价，根据他们合作任务的具体情况来提出客观的优点和不足，保证评价的全面性。

四、结论

总之，在开展基于时变优化函数的多无人艇轨迹跟踪控制相关的教学内容时，专业教师需要关注到当前行业发展的趋势，结合知识教学的特点来对现有的教学体系进行优化。通过重新设计教学内容、创新教学方法并优化评价方式等各种教学手段，可以进一步加深学生对专业技术的认识程度，并且为他们未来的发展打下坚实的基础。

参考文献

- [1] 范岳川. 无人艇轨迹跟踪控制算法研究 [D]. 广东工业大学, 2025.
- [2] 虞启洲. 多无人机协同路径规划与轨迹跟踪研究 [D]. 中国民用航空飞行学院, 2025.
- [3] 孔维霆. 多无人艇航迹跟踪抗干扰快速稳定控制研究 [D]. 广州大学, 2025.
- [4] 罗前达. 多无人艇系统数据驱动无模型协同编队控制研究 [D]. 燕山大学, 2024.
- [5] 郎中祺. 时变遭遇角下的无人艇轨迹跟踪控制研究 [D]. 大连海事大学, 2024.
- [6] 代腾. 多无人艇协同区域覆盖路径规划及控制 [D]. 大连海事大学, 2024.
- [7] 雷文忠. 具有时变目标函数的多智能体系统任意时间优化 [D]. 湘潭大学, 2023.
- [8] 薛小红. 时变网络不交路径优化与时变最短路径修复算法研究 [D]. 太原理工大学, 2022.
- [9] 吴诗辉, 周宇, 李正欣, 刘晓东, 贺波. 基于神经网络的时变参数系统仿真优化方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(02): 472-480.
- [10] 何宇婷. 基于分布式优化的多无人艇协同控制研究 [D]. 大连海事大学, 2021.