



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences

# 博士学位论文

## 面向航速最优的无人帆船设计与优化方法研究

作者姓名: 安 洋

指导教师: 俞建成 研究员 中国科学院沈阳自动化研究所

学位类别: 工学博士

学科专业: 机械电子工程

培养单位: 中国科学院沈阳自动化研究所

2023 年 6 月



**Research on Design and Optimization Methods for the Speed  
Performance of Autonomous Sailboats**

A dissertation submitted to  
**University of Chinese Academy of Sciences**  
in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of  
**Doctor of Engineering**  
in Electromechanical Engineering  
By  
**AN Yang**  
**Supervisor: Professor YU Jiancheng**

**Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences**

**June 2023**



## **中国科学院大学**

### **研究生学位论文原创性声明**

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：

日 期：

## **中国科学院大学**

### **学位论文授权使用声明**

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延期后适用本声明。

作者签名：

导师签名：

日 期：

日 期：



## 摘要

近年来，海洋大数据技术的发展和海洋科学研究向深、远海的扩展，对海洋观测能力提出了新的要求。无人帆船作为一种由风能驱动的海洋观测平台，具有出色的续航力和良好的水声性能，被认为是对现有海洋观测系统的有力补充，在近 20 年间得到了长足的发展。然而，相比于控制等方面的研究，无人帆船设计和优化相关的研究和讨论相对较少。设计和优化研究方面的不足极大的限制了无人帆船的航速性能，进而降低了无人帆船的海洋观测效率和区域通过性。针对这一问题，本文依托“新型水翼无人帆船”课题(Y8K7080702)对无人帆船航速提升的路线和相关设计评价、设计优化方法进行系统性研究，致力于为该类平台的研制与改进提供必要的理论基础和技术储备。主要研究内容和贡献如下：

1. 面向海洋观测的实际需求，从性能角度系统地对无人帆船设计进行梳理和分析，指出目前无人帆船的性能短板在其航速方面、且航速受抗倾覆能力的制约。深入的分析了二者尖锐对立的成因、现状以及设计者难以在这种对立关系中取得最优权衡的原因。针对性的提出了“利用计算流体力学仿真与仿真驱动设计技术寻求航速性能与抗倾覆能力在尖锐对立下的最优权衡”和“提高无人帆船的抗倾覆能力的环境适应性，以寻求缓和二者的尖锐对立，以间接提高航速”两种对策，为后续的研究工作提供理论和方向指导。
2. 开展无人帆船设计的航速性能评价方法研究。针对无人帆船设计问题具有的设计间差异大、缺乏性能先验估计的特点，提出了一种基于水动力仿真和优化求解器的无人帆船航速性能评价方法。水动力仿真的引入提供了较强的通用性，使所提出的方法可以对任意无人帆船设计进行评价。优化求解器的引入提高了求解器在缺乏先验性能估计条件下的全局寻优能力。同时本文创新的利用末位淘汰模块对标准遗传算法求解器进行了改进，并提出了一种基于邻域信息的优化策略，提高了性能量化评价精度和计算效率。相关研究为设计间的横向比较提供了有效方法，为后续的无人帆船设计优化工作提供了基础。
3. 开展面向航速最优的无人帆船设计方法研究。针对无人帆船设计缺乏系统方法的现状，提出了一种无人帆船仿真驱动设计方法。通过引入贝叶斯优化和知识迁移技术，着重的解决了仿真驱动设计在无人帆船设计应用中面对的因设计空间大、无先验性能估计导致的仿真采样“维度灾难”问题。相关研究为无人帆船设计提供了系统性的、定量的设计方法，为在航速与抗倾覆的尖锐对立下寻求二者最优权衡提供了适用工具。
4. 开展面向无人帆船航速提升的增稳水翼优化设计研究。为提升无人帆船

抗倾覆能力的环境适应性，缓和无人帆船设计中抗倾覆能力与航速之间的尖锐对立，介绍了多种能够提供动态抗倾覆能力的环境自适应机构，并分析了其各自与无人帆船的适配性。选择被动水翼作为增稳机构并设计了一型增稳水翼无人帆船方案。结合水动力仿真探索了不同展弦比被动水翼的增稳、增阻和增速效能。相关研究对利用被动水翼提升无人帆船航速的路线进行了验证，为水翼无人帆船的实现提供了设计资料和技术储备。

**关键词：**无人帆船，总体设计，速度预测程序，仿真驱动设计，水翼

## Abstract

In recent years, there has been a growing demand for improved ocean observation capabilities due to the development of ocean big data technology and the expansion of marine scientific research into deep and distant seas. Autonomous sailboats, as wind-powered ocean observation platforms, have emerged as a powerful complement to existing systems. However, the design and optimisation of autonomous sailboats have received relatively little research attention compared to control methods. As the design of autonomous sailboats dramatically affects their performance, preliminary design and optimisation significantly limit their speed performance, reducing ocean observation efficiency and area passability. To address this issue, this thesis, based on the project "New Hydrofoil Autonomous Sailboat" (Y8K7080702), conducts systematic research to improve the speed of autonomous sailboats. The goal is to provide a theoretical basis and technical guidance for developing and enhancing these platforms. The main contributions of this thesis can be summarised as follows:

1. Systematic review and analysis of autonomous sailboat designs: The thesis reviews and analyses the designs in the context of ocean observation requirements. It identifies the speed as the primary limitation of the current platform, which is attributed to its susceptibility to capsizing. The reasons behind the conflict between speed and overturning resistance are thoroughly analysed, along with the challenges designers face in achieving an optimal balance. Two countermeasures are proposed to overcome challenges: using computational fluid dynamics simulation and simulation-driven design techniques to find the optimal trade-off or enhancing the overturning resistance's environmental adaptability.

2. Quantitative evaluation method for autonomous sailboat speed: Considering the significant design space and lack of prior performance estimates for autonomous sailboats, the thesis proposes a speed quantification evaluation method based on computational fluid dynamics simulation and an optimisation solver. The introduction

of computational fluid dynamics simulation enables the evaluation of any autonomous sailboat design. An optimised genetic algorithm solver and an optimisation strategy based on neighbourhood information are presented to enhance the evaluation accuracy and computational efficiency. This research provides an effective method for comparing designs and is a basis for optimising autonomous sailboat design.

3. Design method for speed optimisation of autonomous sailboats: The thesis proposes a simulation-driven design method to address the need for a systematic approach to autonomous sailboat design. This approach tackles the challenge of sampling the vast design space without prior performance estimation by incorporating Bayesian optimisation and knowledge transfer techniques. The research offers a systematic and quantitative approach to autonomous sailboat design, enabling the identification of the optimal trade-off between speed and overturning resistance.

4. Speed optimisation of autonomous sailboats based on stabilising hydrofoils: For enhancing the environmental adaptability of autonomous sailboats and mitigating the trade-off between overturning resistance and speed, the research introduces various environmental adaptive mechanisms for dynamic overturning resistance. The passive hydrofoil is chosen as the stabilising device, and a specific hydrofoil solution is designed. Hydrodynamic simulations explore hydrofoils' stability, drag, and speed enhancement effects with different aspect ratios. This research validates the effect of stabilising hydrofoils in the speed enhancement of autonomous sailboats and provides design information and technical insights for realising hydrofoil-assist autonomous sailboats.

**Key Words:** Autonomous Sailboat, General Design, Velocity Prediction Program, Simulation Driven Design, Hydrofoils

## 目 录

目 录.....	I
图目录.....	III
表目录.....	VI
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 无人帆船发展历史.....	3
1.3 无人帆船驱动机理与组成.....	8
1.4 无人帆船航速性能相关设计现状.....	11
1.4.1 无人帆船设计的航速性能评价现状.....	13
1.4.2 面向航速性能的无人帆船设计现状.....	16
1.5 本文的主要研究内容.....	20
第 2 章 无人帆船航速性能提升制约因素与对策分析 .....	22
2.1 引言.....	22
2.2 无人帆船设计中航速性能与抗倾覆能力的量化评价.....	22
2.3 无人帆船设计中的航速性能提升制约因素分析.....	25
2.3.1 抗倾覆能力无法随环境变化.....	25
2.3.2 抗倾覆能力普遍缺失.....	27
2.3.3 设计资料、资源匮乏.....	28
2.4 无人帆船设计中的航速性能制约对策分析.....	30
2.5 本章小结.....	31
第 3 章 无人帆船设计的航速性能评价方法研究 .....	33
3.1 引言.....	33
3.2 基于计算流体力学仿真和优化求解器的无人帆船航速性能评价方法.....	33
3.2.1 基于计算流体力学仿真的平衡方程构建.....	34
3.2.2 采用改进遗传算法求解器的独立状态求解.....	39
3.2.3 采用基于邻域信息的优化策略的相关状态的联合求解.....	40
3.3 “海鸥号”的航速性能评价 .....	41
3.3.1 “海鸥号”无人帆船原理样机 .....	41

3.3.2 基于所提出方法的“海鸥号”航速性能评价 .....	43
3.4 对“海鸥号”航速性能评价结果的海试验证 .....	49
3.5 本章小结.....	52
<b>第 4 章 面向航速最优的无人帆船设计方法研究 .....</b>	<b>53</b>
4.1 引言 .....	53
4.2 基于贝叶斯优化和知识迁移的无人帆船仿真驱动设计方法.....	53
4.2.1 问题描述.....	53
4.2.2 采用贝叶斯优化与知识迁移的动机.....	55
4.2.3 方法细节.....	56
4.3 面向航速最优的“海鸥号”总体配置优化 .....	61
4.3.1 优化对象的选取及系统实现.....	61
4.3.2 方法验证与结果分析.....	65
4.4 本章小结.....	68
<b>第 5 章 面向无人帆船航速提升的增稳水翼优化设计研究 .....</b>	<b>69</b>
5.1 引言 .....	69
5.2 被动水翼等环境自适应机构与无人帆船的适配性分析.....	69
5.3 利用被动水翼优化无人帆船航速性能的核心设计问题.....	73
5.4 面向航速最优的无人帆船增稳水翼方案设计 .....	75
5.4.1 现有被动水翼配置评估 .....	75
5.4.2 面向航速最优的被动水翼增稳无人帆船方案.....	77
5.5 水翼增稳机构的效能研究.....	79
5.5.1 基于水动力仿真的水翼增稳效能研究.....	79
5.5.2 基于性能量化评价的水翼增速效能研究.....	83
5.6 本章小结.....	86
<b>第 6 章 结论与展望 .....</b>	<b>87</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>89</b>
<b>附录 符号说明.....</b>	<b>103</b>
<b>致 谢.....</b>	<b>106</b>
<b>作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果 .....</b>	<b>108</b>

## 图目录

图 1- 1 海洋观测技术和发展时间表 <sup>[6]</sup> .....	2
图 1- 2 海洋观测技术的发展与其引发的“数据海啸” <sup>[16]</sup> .....	2
图 1- 3 SKAMP 概念图与实物图 <sup>[31,35]</sup> .....	4
图 1- 4 “The Atlantis”无人帆船 <sup>[34]</sup> .....	4
图 1- 5 AMS 公司的 Datamaran 无人帆船 <sup>[40]</sup> .....	6
图 1- 6 可以将帆折叠后下潜的 Submaran S10 无人帆船 <sup>[41]</sup> .....	6
图 1- 7 Saildrone 观测得到的海表温度与二氧化碳通量等数据 <sup>[30,44]</sup> .....	7
图 1- 8 Saildrone 系列无人帆船 <sup>[43]</sup> .....	7
图 1- 9 横帆船与纵帆船 .....	8
图 1- 10 航行方向与帆的调整 <sup>[55]</sup> .....	9
图 1- 11 纵帆船顺风航行状态 .....	10
图 1- 12 纵帆船迎风航行机理 .....	10
图 1- 13 纵帆船的组成 .....	11
图 1- 14 全球洋流分布 <sup>[78]</sup> .....	12
图 1- 15 VPP 的原理示意图 <sup>[80]</sup> .....	13
图 1- 16 帆船上的水、气动力平衡 <sup>[81]</sup> .....	14
图 1- 17 典型 VPP 极坐标图 <sup>[82]</sup> .....	14
图 1- 18 DSYHS 母型(左)与 A-TIRMA G2 型线(右)的对比 .....	16
图 1- 19 VPP 预测值波动 <sup>[94]</sup> .....	16
图 1- 20 提升平台抗倾覆能力不同途径 .....	17
图 1- 21 无人帆船航速性能与系统整体的耦合性 .....	18
图 1- 22 帆船仿真驱动设计框架 .....	19
图 1- 23 有人帆船(赛艇)仿真驱动设计采样示意图 .....	19
 图 2- 1 现有设计的相关无量纲数频次分布直方图 .....	24
图 2- 2 IMOCA60 级帆船的 10 种常规帆配置 .....	25
图 2- 3 Libera 帆船的船员在进行压舷 <sup>[128]</sup> .....	26
图 2- 4 南极特化版 Saildrone <sup>[74,130]</sup> .....	27
图 2- 5 部分无人帆船平台的长度、排水量统计图 .....	28
图 2- 6 Datamaran 的主动自扶正系统 <sup>[40]</sup> .....	31
图 2- 7 Submaran S10 的可收放帆 <sup>[75]</sup> .....	31

图 3- 1 速度预测程序的组成 .....	34
图 3- 2 本文方法的示意图 .....	34
图 3- 3 在特定外界条件下的航态的定义 .....	35
图 3- 4 参考坐标系 .....	35
图 3- 5 横滚和偏航自由度的平衡示意图 .....	38
图 3- 6 带有末位淘汰机制的改进 GA 求解器 .....	40
图 3- 7 基于邻域信息的的优化策略示意图 .....	41
图 3- 8 无人帆船样机“海鸥” .....	41
图 3- 9 样机定位尺寸(mm) .....	42
图 3- 10 计算域设置 .....	44
图 3- 11 网格设置 .....	44
图 3- 12 帆的 CL、CD 曲线 .....	45
图 3- 13 在 $Fr=0.18$ 时的水动力阻力与侧向力响应曲面 .....	45
图 3- 14 标准求解器与改进 GA 求解器收敛速度对比 .....	46
图 3- 15 NIBO 策略有效性验证 .....	47
图 3- 16 VPP 预测结果 .....	48
图 3- 17 本文与 Saoud 等人研究 <sup>[154]</sup> 的输入对比 .....	49
图 3- 18 与相关文献中帆最优控制量的对比 .....	49
图 3- 19 “海鸥”号正在准备首航 .....	50
图 3- 20 定向航行数据 .....	51
图 3- 21 预测数据与实航数据对比 .....	51
 图 4- 1 问题描述 .....	54
图 4- 2 理想化采样的示意图 .....	55
图 4- 3 "不同设计参数但具有相同拓扑"示意图 <sup>[109]</sup> .....	56
图 4- 4 本文提出的仿真驱动方法的流程图 .....	57
图 4- 5 知识迁移代理的网络结构 .....	58
图 4- 6 设计流程中的软件交互 .....	63
图 4- 7 船体和龙骨的计算域设置 .....	63
图 4- 8 在顺风(左)和迎风(右)时的帆计算域设置 .....	64
图 4- 9 网格设置 .....	64

---

图 4- 10 知识迁移代理效果验证 .....	66
图 4- 11 设计帕累托前沿 .....	67
图 4- 12 设计参数对优化目标的影响 .....	67
图 5- 1 广义面积可变帆 .....	70
图 5- 2 充气翼帆 .....	71
图 5- 3 变种帆 .....	71
图 5- 4 增稳机构(被动水翼和可倾龙骨) <sup>[196,197]</sup> .....	72
图 5- 5 被动水翼对无人帆船航速性能的影响 .....	74
图 5- 6 稳性三角形 .....	75
图 5- 7 单体、双体船在正浮稳定性和倒浮稳定性之间的区别 .....	76
图 5- 8 部分被动水翼帆船设计方案 <sup>[201]</sup> .....	77
图 5- 9 不同被动水翼配置的稳定性构成 .....	77
图 5- 10 水翼增稳无人帆船方案 .....	78
图 5- 11 设计方案三维图 .....	79
图 5- 12 计算域设置 .....	80
图 5- 13 网格设置 .....	81
图 5- 14 被动水翼对回复力矩和阻力的影响 (以 AR=3, $\theta=20$ 为例) .....	81
图 5- 15 不同横倾角下被动水翼对回复力矩和阻力的影响 .....	82
图 5- 16 裸船体与不同水翼配置的“抗倾覆效能臂” .....	83
图 5- 17 两种帆配置的“倾覆效能臂” .....	84
图 5- 18 最大航速评估流程图 .....	85

## 表目录

表 1- 1 文献记录的无人帆船航行失效案例 <sup>[22,36,77]</sup> .....	12
表 2- 1 基于无量纲数的现有设计统计 .....	23
表 2- 3 无人帆船设计参照统计表 .....	28
表 3- 1 子系统间坐标转换关系 .....	35
表 3- 2 无人帆船原型机设计参数 .....	42
表 4- 1 优化设计过程中的参数设置 .....	65
表 4- 2 本文方法与离线方法平衡求解质量对比 .....	65
表 4- 3 优化设计结果 .....	68
表 5- 1 环境自适应机构应用于无人帆船的优缺点 .....	72
表 5- 2 水翼无人帆船设计参数 .....	79
表 5- 3 不同水翼和帆配置对航速(迎风)的影响.....	85

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

海洋是地球的重要组成部分，覆盖了地球表面的 71%。作为地球生态系统最为重要的组成部分，海洋对人类的生产生活实践起到重要作用。从地球的生态循环与能量平衡方面而言，它不仅在热量、碳和热辐射的循环中起到关键作用，也对地球的生物、化学和水循环产生着深远的影响。从人类的日常生活方面而言，海洋蕴藏着可资人类开发利用的、丰富的矿产资源和渔业资源，它同时也是台风、海啸、地震等自然灾害的主要发源地之一。从战略规划与国际地缘政治方面而言，千百年来，海洋既是世界各国遂行军事活动的主战场，也是部分海洋强权国家经略海洋、控制贸易航道、实现海权战略的角力场。海洋的战略地位使得各国都非常注重维护国家海洋权益、发展海洋经济、保护海洋环境、开发海洋资源<sup>[1]</sup>。正因为海洋对人类具有如此重要的意义，所以在人类科技迭代发展的过程中，世界各国都致力于海洋观测技术研发。

海洋观测是认识和了解海洋的重要手段，也是开发和利用海洋资源的前提条件。传统的海洋观测手段包括卫星、船基、浮(潜)标观测等。卫星观测利用遥感技术对来自海面的电磁辐射进行监测，通过数据反演获得海洋数据。其优点是可以方便的获得大面积数据，但受天气、云层等因素的影响，其数据精度有限。科考船观测历史悠久<sup>[2-5]</sup>，设备专业化程度高，可以得到多种类型较为精确的现场数据。但科考船受制于燃料、补给、人员耐受性等问题，其观测区域多集中于夏季低纬度海区<sup>[6]</sup>，时空范围十分有限<sup>[5,7]</sup>。浮、潜标观测<sup>[8,9]</sup>可以提供特定区域实时的、高精度连续时间序列的现场数据<sup>[10,11]</sup>。然而浮、潜标缺乏水平驱动能力，无法主动、机动地对大面积海域进行观测<sup>[12,13]</sup>。

随着 20 世纪 90 年代以来自动控制、导航、通信等技术的发展，为弥补传统海洋观测手段的不足，海洋机器人被广泛地应用于海洋观测中<sup>[14]</sup>。自主水下机器人(AUV)、遥控水下机器人(ROV)、水下滑翔机、波浪能滑翔机、无人帆船等海洋机器人在航速、深度、续航力、载荷等方面都各有优势<sup>[15]</sup>，极大地丰富了海洋数据的获取并改善了海洋观测数据在时间和空间上的不均衡，共同完善了海洋观测体系(图 1-1)。数据显示，近 20 年来由海洋机器人获得的海洋观测数据已超过了之前一百年的数据总量之和<sup>[16]</sup>(图 1-2)，海洋机器人在海洋环境监测、海洋生物调查、海洋资源勘探和开发、海洋灾害预警等领域中都发挥了重要作用，为人类更好地理解、利用和保护海洋提供了有力支持。

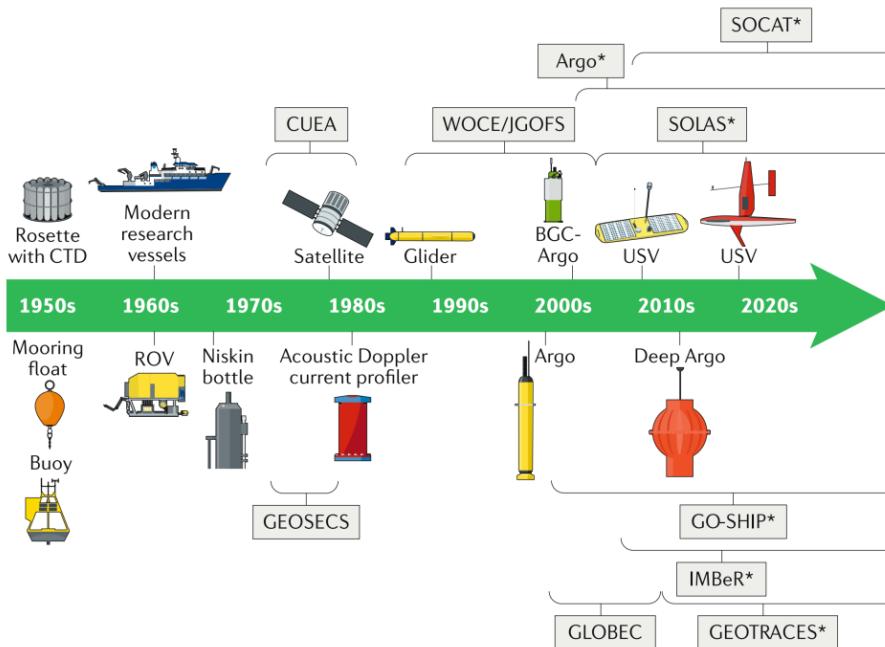
图 1-1 海洋观测技术和平台发展时间表<sup>[6]</sup>

Figure 1-1 Timeline for the development of ocean observation technologies and platforms<sup>[6]</sup>

### DATA TSUNAMI

The rapid growth in ocean information in the past decade has not been accompanied by a rethink of how data are collected, shared and accessed. Historical data-management methods prevent a comprehensive understanding of the impact of human activities on the ocean.

#### Type of instrument:

- Bottle
- Bathythermograph
- CTD<sup>\*</sup>
- Buoy (moored or drifting)
- Attached to a marine animal
- Autonomous vehicle
- Other

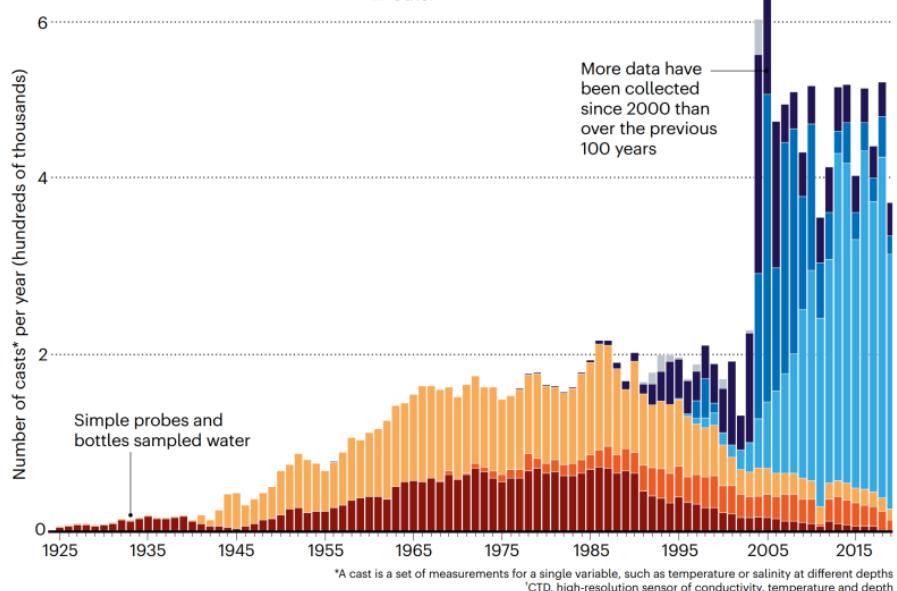
图 1-2 海洋观测技术的发展与其引发的“数据海啸”<sup>[16]</sup>

Figure 1-2 The development of ocean observation technology and the resulting ‘Data Tsunami’<sup>[16]</sup>

相较于动力驱动的海洋机器人，无人帆船依赖风能驱动，仅控制、通信和科学载荷模块需要额外的能量(通常是电能)输入<sup>[17]</sup>，这极大的降低了其平均能耗，

使其在续航力方面具有天生的优势。因此其可以胜任对远海区域进行现场观测<sup>[6,7]</sup>和对特定海域的长期监测任务<sup>[18-23]</sup>。较低的成本使得它可以通过平台和航次的数量优势来得到更大的时空覆盖范围<sup>[24,25]</sup>。没有主机振动的特点，使其具备良好的声学性能，特别适合部署或拖曳声学设备进行水声、生物、渔业调查<sup>[26,27]</sup>。上述性能优势使得无人帆船补强了<sup>[6,28,29]</sup>现有海洋观测体系获取在空间 10 米到 1000 公里级别、时间一小时到一年尺度的海面和水层的时空数据的能力<sup>[30]</sup>。

为了使无人帆船能够在环境复杂的海洋中长期、高效地执行海洋观测任务，无人帆船的设计需要考虑诸多因素，例如：确保结构耐久性，以保证组件能够承受相关载荷而不至发生失效和性能上不可接受的退化；确保平台的能源自持力，使之在持续工作时维持能源消耗和获取的平衡；确保平台的抗倾覆能力，以降低平台在恶劣环境中的倾覆概率，增强倾覆后自主扶正的概率；提高其在不同环境中的航速等。经过 20 余年的发展，无人帆船研究社群已经解决了结构耐久性、能源自持力和抗倾覆能力中的大部分问题，现在无人帆船已经可以在恶劣的环境中完成百天级别的海洋观测任务。然而在航速性能相关的问题上，无论是设计评价还是设计方法相关的研究和讨论都存在一定的空白。海洋观测任务通常具有较大的空间尺度，或需要大范围转场，平台航速性能的提升能够有效的缩短完成任务所需的时间，对于一些特定的现象和目标，尤其是时间敏感型的现象和目标，较高的航速可以确保观测数据的时效性；此外，海洋中存在洋流，足够的航速能够保证无人帆船具备足够的区域通过性。因此，为了确保无人帆船在复杂多变的海洋环境中保持较高的海洋观测效率，开展针对面向无人帆船航速最优的设计与优化方法的研究具有重要的现实意义。

## 1.2 无人帆船发展历史

无人帆船发展至今约有 50 年的历史，主要分为三个阶段：1968 年-2004 年的萌芽阶段，2005 年-2017 年的发展阶段，以及 2018 年至今的应用阶段。

### 1) 萌芽阶段

无人帆船的记录最早可追溯至 1968 年美国研制的站位保持自主移动平台 (Station Keeping Autonomous Mobile Platform, SKAMP)项目<sup>[31]</sup>(图 1-3)。该项目旨在依托卫星的辅助，使用一个带有翼帆的半浸没平台实现海上定位值守，以对海洋指定区域进行军事目的的监控。然而，该项目平台并没有得到实际应用。另一个早期项目是始于 1995 年德国富特旺根应用科学大学(Furtwangen University of Applied Sciences)的 Relationship 项目<sup>[32]</sup>，该项目计划采用一个帆和舵由程序自动控制且装备软帆的三体船帆船进行环球航行。但是，受限于当时的技术条件，无人帆船对周围环境和障碍的感知存在较大困难，因此该项目受到了海事监管方面的压力，其最后一直停泊在葡萄牙亚速尔群岛 (The Azores)。1997 年，Jaime Abril

和 Jaime Salom 发表了可以检索到的最早的有关无人帆船的论文 Fuzzy control of a sailboat<sup>[33]</sup>，提出了使用无人帆船作为自主海洋观测平台的设想。作者设计了一种基于规则的帆、舵模糊控制系统来优化帆船的航速，并以 1m 级的双桅帆船 (Ketch type) 模型帆船为研究对象。2001 年开始，斯坦福大学开展了 Atlantis 项目<sup>[32]</sup>(图 1-4)，旨在设计、开发、测试一艘无人帆船。该项目的独特之处是采用了自平衡翼帆，即由尾翼来控制帆的迎角的翼帆。其船体为改良的 Prindle-19 轻型双体船。海上试验表明其控制精度可达 0.3m<sup>[34]</sup>。

在此阶段，设计者们致力于从概念上实现无人帆船，研究重点集中在无人帆船的控制问题上。尽管一些样机被研制出来，但其主要是作为验证各种控制技术的平台，运行海域也多限于港湾和湖泊等理想环境，无法投入实际工程应用。此外，由于感知等系统的不成熟，无人帆船在实际应用方面仍面临巨大的困难。关于无人帆船的早期历史的更多细节可参阅文献<sup>[32,35]</sup>。



图 1-3 SKAMP 概念图与实物图<sup>[31,35]</sup>

Figure 1-3 The conceptual and actual images of SKAMP<sup>[31,35]</sup>

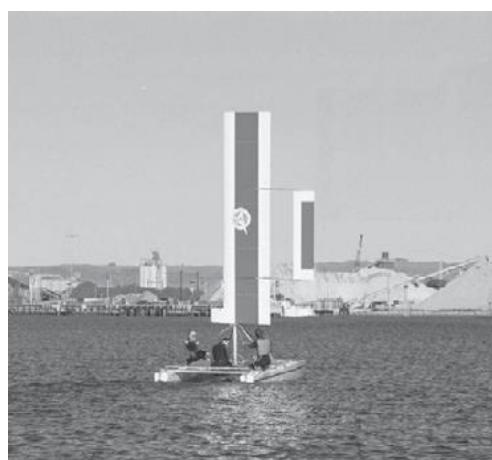


图 1-4 “The Atlantis”无人帆船<sup>[34]</sup>

Figure 1-4 Autonomous sailboat ‘The Atlantis’<sup>[34]</sup>

## 2) 发展阶段

无人帆船进入发展阶段的一个重要标志是 Microtransat 挑战赛与国际帆船机器人锦标赛/国际帆船机器人会议(World Robotic Sailing Championship/International Robotic Sailing Conference, WRSC/IRSC) 的诞生。Microtransat 挑战赛是由阿伯里斯特维斯大学(Aberystwyth University)的 Mark Neal 和法国国家高等航空与航天学校(Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, ISAE) 的 Yves Briere 共同倡议，旨在通过无人帆船完成大西洋横渡的挑战赛。Microtransat 挑战赛于 2006 年开展前期活动，首次正式比赛在 2010 年举行<sup>[36]</sup>。这项比赛吸引了众多研究人员对无人帆船的研究，促进了该领域的长久发展。此外，赛会记录了各个参赛平台的设计参数、表现及失效原因，为后续无人帆船的设计和研究工作提供了宝贵的设计资料和实航数据。国际帆船机器人锦标赛是一个国际性的无人帆船比赛。与类似拉力赛的 Microtransat 挑战赛不同，国际帆船机器人锦标赛更像是一个场地赛，注重小型无人帆船在近海或湖泊中的智能性。典型的竞赛项目包括循迹、避障、协同搜索等。比赛结束后，还会举行国际帆船机器人会议，并出版相应的论文集。这两项比赛的诞生极大地激发了各国研究者在无人帆船研究领域的热情，并为无人帆船研究社群提供了宝贵的交流平台。

在 2006 到 2017 年期间，许多学术组织、科研院所和公司在无人帆船的研发工作中投入了大量精力，研究成果出现了井喷式的增长。这一时期的研究内容涵盖了无人帆船的总体设计、硬件设计、传感器设计、电源管理、控制、避障、路径规划等领域，出现了一大批特色鲜明的无人帆船平台<sup>[35,37]</sup>。得益于研究的不断深入，无人帆船得到了更加广泛的投资和关注。例如：2015 年美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)投资了 AMS 公司的 Datamaran 无人帆船项目，Datamaran(图 1-5)是一种双体无人帆船，其最大的特点是在倾覆后自行扶正，适合用以进行气象学和海洋学的数据收集<sup>[38]</sup>。另外，世界上最大的武器生产商之一洛克希德·马丁空间系统公司(Lockheed Martin Space Systems Company, LMT)也投资了 Ocean Aero 公司的 Submaran S10 无人帆船项目。Submaran S10(图 1-6)是一种兼备自主水下航行和帆船航行能力的平台，它配备有可折叠的翼帆，能在水下潜航模式和水面帆航模式间切换。洛克希德·马丁空间系统公司认为，这种设计使得平台兼具良好的续航力、生存能力和隐蔽性，具有很大的军事应用潜力<sup>[39]</sup>。无人帆船结束发展阶段的重要标志是 2015 年 Saildrone 在白令海峡完成百天级海洋应用<sup>[18]</sup>以及 2017 年 Sailbuoy 首次完成大西洋横渡<sup>[23]</sup>。这一时期无人帆船完成了从实验室样机向应用平台的过渡，开始成为海洋观测体系中不可或缺的工具。

图 1-5 AMS 公司的 Datamaran 无人帆船<sup>[40]</sup>Figure 1-5 Autonomous sailboat ‘Datamaran’<sup>[40]</sup>图 1-6 可以将帆折叠后下潜的 Submaran S10 无人帆船<sup>[41]</sup>Figure 1-6 Submaran S10 that can be submerged with the sail folded<sup>[41]</sup>

### 3) 应用阶段

尽管早在 2013 年左右，Sailbuoy 无人帆船就已经开始进行海洋观测活动，例如：为期 22 天的对西班牙加那利群岛(Gran Canaria) 海表的持续观测<sup>[42]</sup>，以及对墨西哥湾为期两个月的的持续观测<sup>[21]</sup>。但是大规模的海洋观测应用始于 2017 年左右。作为美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)数据供应商的 Saildrone 公司是无人帆船应用领域的领军者。受益于在沙漠风力车的长期研究积累，Saildrone 无人帆船兼有高航速和低能耗的特点，标称续航力可达 12 个月<sup>[43]</sup>。2018 年，Saildrone 无人帆船在加利福尼亚附近海域进行了为期 60 天的海洋观测活动，用以校验卫星遥感得到的海面温度和海面盐度的数据准确性<sup>[30]</sup>。2019 年 1 月-3 月 Saildrone 完成了对墨西哥湾湾流的五次穿越，测量了海表和大气参数，用以研究海洋的与大气的热量交换<sup>[44]</sup>。同年，Saildrone 完成了对南极的首次自主环航，并对南极地区的二氧化碳通量进行了观测<sup>[45]</sup>(图 1-7)。其后，Saildrone 在全球各海域开展了大量的海洋观测活动。据称，其舰队在地球上一些最极端的天气条件下已经累计航行超过 10,000 天<sup>[46]</sup>。

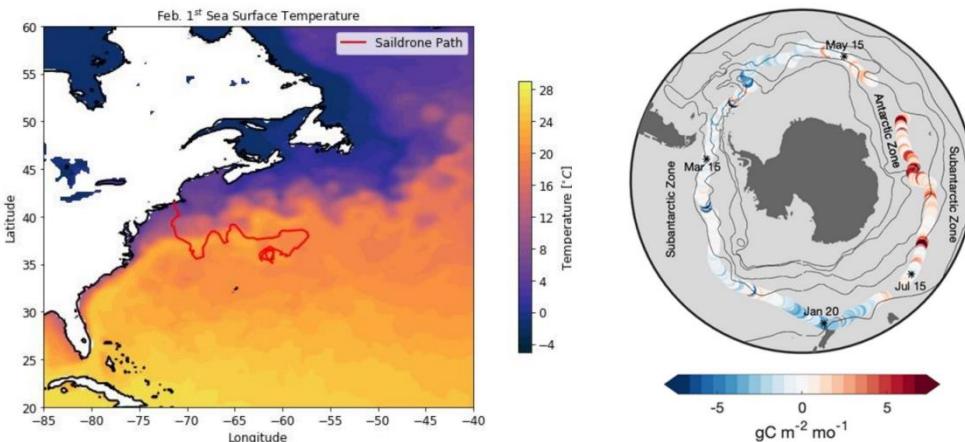


图 1-7 Saildrone 观测得到的海表温度与二氧化碳通量等数据<sup>[30,44]</sup>  
Figure 1-7 Observed sea surface temperature and CO<sub>2</sub> fluxes from Saildrone<sup>[30,44]</sup>

目前无人帆船正呈现出大型化和军用化的趋势。2016 年，IBM 计划开发一艘名为五月花号 (Mayflower Autonomous Ship, MAS) 的大型无人船，以纪念 1620 年同名三桅杆帆船将英国移民带到北美历史事件。最初，该船计划采用无人帆船的形式，装备三个配备有传感器和科学仪器的研究舱，旨在促进海上网络安全、海洋哺乳动物监测、海平面测绘和海洋塑料等方面的研究。虽然这艘长 15 米的五月花号最终被改为太阳能和电能驱动的无人船<sup>[47]</sup>，但这标志着当前无人帆船正朝着大型化的方向发展。作为无人帆船领域的领航者，Saildrone 系列无人帆船也开始了大型化进程。该公司建造了一款长达 22 米，重达 12700 公斤的大型无人帆船 Saildrone Surveyor<sup>[46]</sup>(图 1-8 右一)，主要用于携带大型声学仪器进行海洋地形绘制。目前，该平台已经完成了从旧金山到夏威夷的首航，航程约为 2250 海里。



图 1-8 Saildrone 系列无人帆船<sup>[43]</sup>  
Figure 1-8 ‘Saildrone’ series of autonomous boats<sup>[43]</sup>

在无人帆船军事化应用方面，2022 年夏季和秋季，伊朗伊斯兰革命卫队在红海沿岸捕获了多艘橙色涂装的 Saildrone 无人帆船，并由此诱发了与美国海军

一些龃龉和摩擦。虽然美国海军宣称无人帆船“没有武装”，其在红海南部的观测和拍摄行动也是“非秘密的”，但是考虑到无人帆船强大续航力和水声调查性能，伊朗指认这些无人帆船是披着研究任务外衣的侦查无人艇也是无可厚非的。随后美国海军在红海沿岸的约旦亚喀巴湾 (Gulf of Aqaba) 举行的军事演习中，首次派出了海军灰涂装的无人帆船。美国海军第五舰队副司令布拉德-库珀 (Brad Cooper) 声称，2023 年夏季结束前，美军将在阿拉伯半岛周围海域部署不少于 100 艘的各种无人水面舰艇进行巡逻<sup>[48]</sup>，照此发展下去，无人帆船的大规模军事化应用可能已近在咫尺。

### 1.3 无人帆船驱动机理与组成

相较于依赖主机推进的船舶，帆船作为一种古老而又独特的交通工具，对大众来说可能相对陌生。本节将对无人帆船的驱动机理和组成进行介绍，为后续关于其性能和设计方面的工作提供必要的知识背景。在大多数影视、美术作品中出现的经典帆船的形象是如图 1-9a 的横帆船。横帆船的船帆横向铺设在横桁上。横帆船可以顺季风快速航行，但其难以迎风航行（横帆船并不是严格的不能迎风航行，只是其迎风航行的能力也主要是由斜纵帆提供的<sup>[49]</sup>）。在顺风时，横帆起到类似“降落伞”的作用，依靠风速与船速的差值产生的来自侧后方的推力驱动帆船前进。



(a) 艺术作品中的横帆船



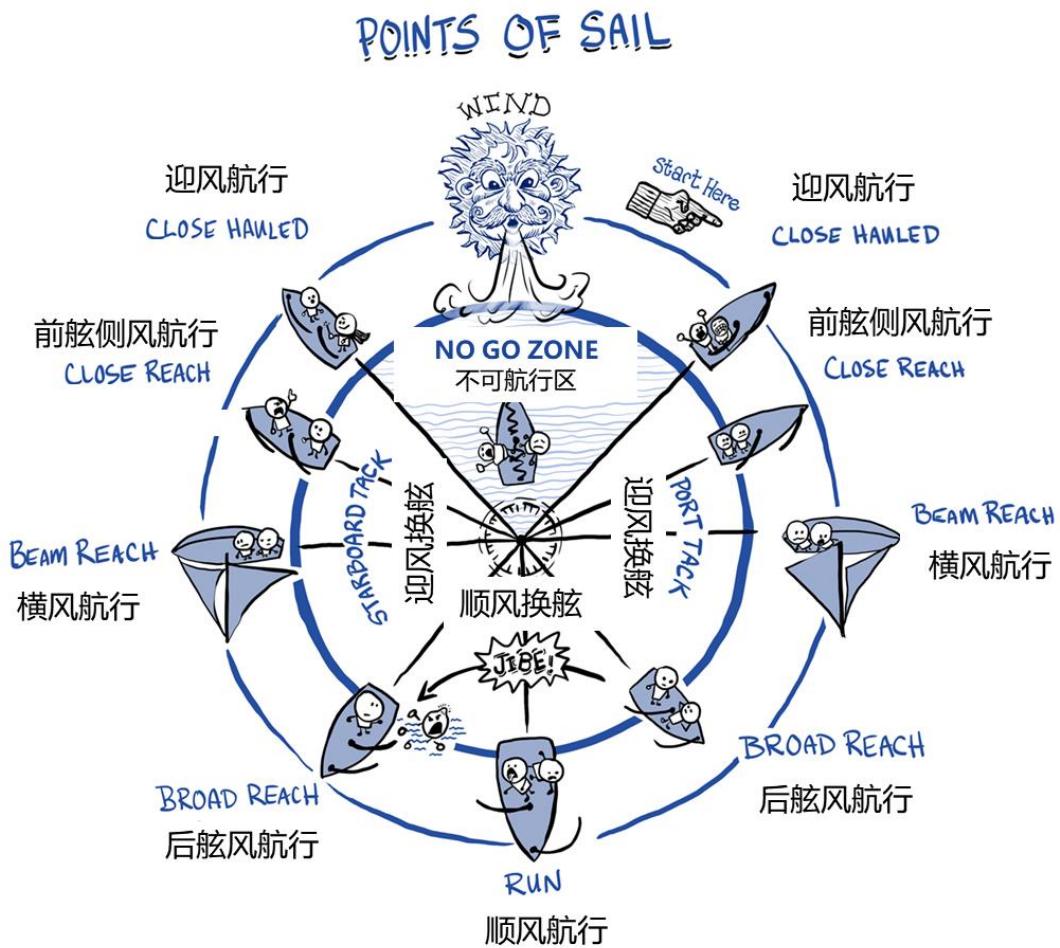
(b) 纵帆船游艇<sup>[50]</sup>

图 1-9 横帆船与纵帆船

**Figure 1-9 Square-rigged sailboat and fore-and-aft rigged sailboat**

现代帆船和绝大多数无人帆船都为纵向布置帆的纵帆船(图 1-9b)，纵帆船最突出的优点是在顺风或迎风下均能航行(图 1-10)。在顺风时，纵帆船的航行原理与横帆船相近——此时船帆将会被调整至垂直于风的状态，形成“蝴蝶帆”(图 1-11a)，对于一些有人帆船，船员还会释放球帆(图 1-11b)，以利用风速和船速的差

值产生驱动力。此时，由于帆上受到的相对风速(帆上受到的风速)是恒小于真风速(风对地的速度)的，因此帆船的顺风航速是无法超越真风速的。纵帆船迎风航行的机理存在一些争议，但其中最被广泛接受的是基于伯努利原理的解释<sup>[51,52]</sup>。这种观点认为，在迎风航行时，无论是传统软帆还是翼帆都可被视作一个垂直的翼型，根据伯努利原理，帆两侧的流速差产生压强差进而生成升力。升力的前向分量成为帆船的驱动力，而侧向分量产生侧向力和倾覆力矩(图 1-12)。由于分力的性质，所以正迎风的一定角度内(一般约 30-60° )帆船沿直线航行无法产生足够的前进动力，此区域也称作死区(No Go Zone)。为了向迎风小角度内航行，纵帆船需要不断的迎风换舷 (Tracking，指改变帆船的受风侧)以 Z 字型前进。当迎风航行时，由于帆上受到的相对风速是船速和真风速的矢量和，因此船的速度在理论上是可以超过真风速的。这通常出现在高速阻力较小的运动水翼帆船或特殊的冰帆船上<sup>[53,54]</sup>。

图 1-10 航行方向与帆的调整<sup>[55]</sup>Figure 1-10 Points of sail and sail trim<sup>[55]</sup>



(a) 顺风时展成“蝴蝶帆”的纵帆船 (b) 在顺风中换装球帆的纵帆船

图 1-11 纵帆船顺风航行状态

Figure 1-11 Fore-and-aft rigged sailboat sailing in downwind condition

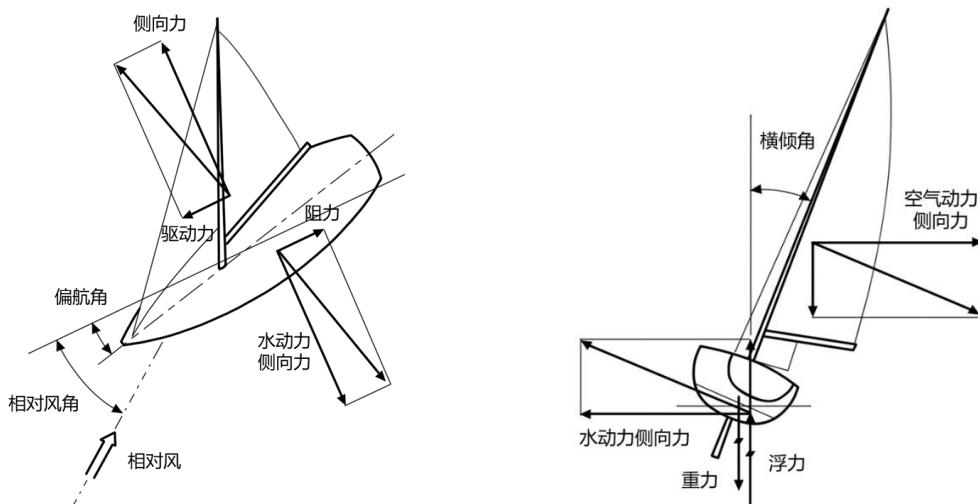


图 1-12 纵帆船迎风航行机理

Figure 1-12 Mechanisms of upwind sailing on fore-and-aft rigged sailboat

在迎风航行时，驱动力的产生还会伴随侧向力和倾覆力矩的生成。因此，除了为设备和人员提供舱容和浮力的船体、提供动力的帆系统(帆、桅杆、前帆缆绳、主帆缆绳)、作为“方向盘”的舵系统(舵柄和舵)，帆船上还有一个重要的组成部分——龙骨。现代帆船的龙骨通常是一个独立于船体的大升力翼型(图 1-13)，龙骨可以帮助帆船以少量的偏航角为代价抵消使船体横移的力(即帆产生的侧向力)。对于大型帆船，龙骨一般采用铸铁或铅制成，可以带来大量的质量稳定性，为帆船提供更大的抗倾覆能力，对于一些轻型帆船，由于船员可以通过自身体重进行压舷(Hiking)，因此通常采用只有翼型的轻型龙骨，也称稳向板(Daggerboard)或中心板(Centerboard)。对于无人帆船，其基本组成与图 1-13 所示纵帆船基本一致，只是其对环境的感知由气象站等传感器完成，主帆缆绳、前帆缆绳、舵柄等相关控制机构由自动控制系统(可能通过不同的结构)控制。



图 1-13 纵帆船的组成

Figure 1-13 Components of a fore-and-aft rigged sailboat

#### 1.4 无人帆船航速性能相关设计现状

经过 20 余年的发展，无人帆船在结构耐久性、能源自持力、抗倾覆能力等核心性能方面得到了显著的提升。在结构耐久性方面，传统软帆<sup>[23,56]</sup>越来越多地被耐久性更高的刚性翼帆<sup>[37]</sup>所取代。同时，科研人员采用了自锁机构和可以自由旋转的翼帆形式来提升转帆机构的耐久性。此外双翼帆<sup>[57-59]</sup>、双舵<sup>[32,58]</sup>、船体加强<sup>[60,61]</sup>等的采用进一步提高了系统的耐久性冗余。在能源自持力方面，大多数无人帆船上装备了较大面积的太阳能板<sup>[40]</sup>或小型风力发电机<sup>[62-64]</sup>、一些平台上还对太阳能板进行了智能化改进<sup>[65,66]</sup>，提高了平台能源获取的效率。平衡帆<sup>[67-69]</sup>、自平衡帆<sup>[34,66,70]</sup>以及自动转向装置<sup>[70,71]</sup>的使用，极大地降低了平台的能耗。在抗倾覆能力方面，大多数无人帆船采用了正浮稳定性好、倒浮稳定性差的单体帆船形式<sup>[66,72]</sup>，以保证平台即倾覆后也可以在外界的扰动下扶正<sup>[72]</sup>。同时通过减小帆面积<sup>[73,74]</sup>、增加龙骨质量<sup>[73]</sup>等方式降低平台的倾覆风险。在部分平台中还设计了可完全折叠的翼帆<sup>[75]</sup>或在倾覆后可以提供主动扶正能力的系统<sup>[40]</sup>。上述的技术发展使得结构耐久性、能源自持力、抗倾覆能力不再是制约无人帆船海洋观测能力的核心因素。

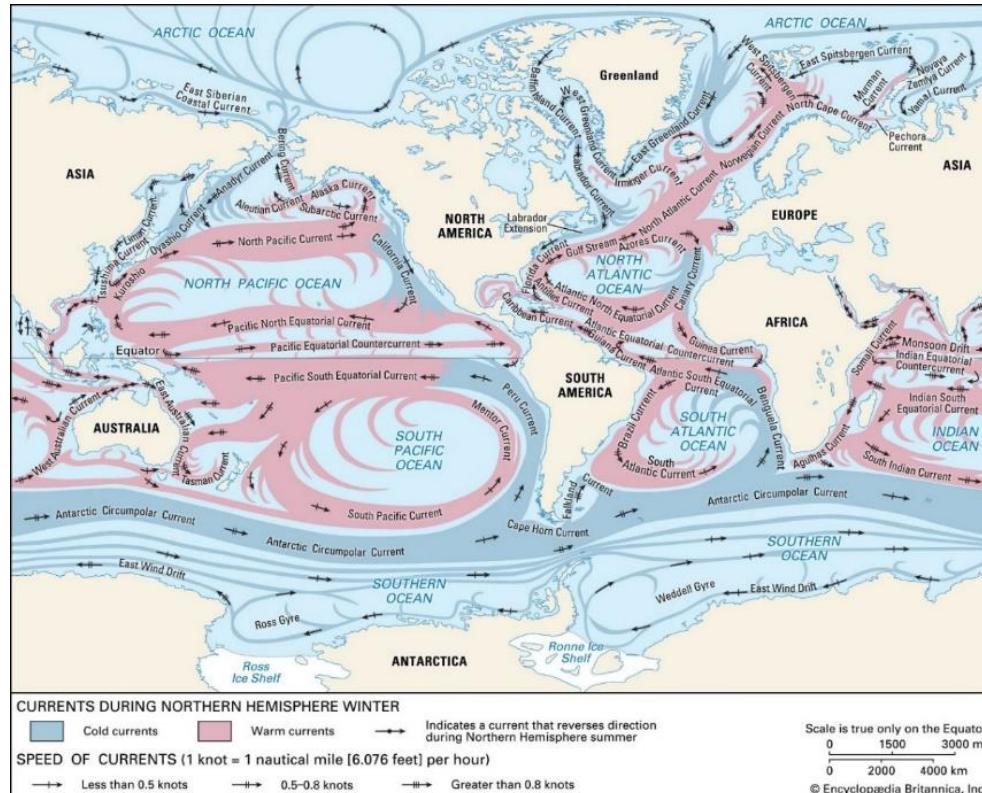
而在航速性能方面，无论是设计的航速性能评价还是面向航速性能的设计相关研究都存在一定的空白。对于区域覆盖等大空间尺度海洋观测任务，航速的微小差异会在任务时间上产生显著影响。而在灾害监测和水团跟踪方面，航速直接决定了平台是否有足够的能力对特定目标进行跟踪<sup>[76]</sup>。此外，航速是无人帆船通

过性的决定因素。相关文献<sup>[22,77]</sup>和 Microtransat 挑战赛<sup>[36]</sup>的比赛记录都表明目前许多无人帆船的航速不足(表 1-1)，较低的航速导致了平台在途径岛屿周围或海洋特定区域时易被强流所捕获最终搁浅并受损<sup>[36]</sup>。在大洋级别的航行中，航速较慢的平台在风速风向不利的季节或区域可能不得不放弃较近的航线，以避免受到强烈海洋环流的影响(图 1-14)，这可能严重降低平台的转场能力和效率。

表 1-1 文献记录的无人帆船航行失效案例<sup>[22,36,77]</sup>Table 1-1 Reported failure cases of autonomous sailboat voyages<sup>[22,36,77]</sup>

平台	时间	失效组件	失效前航行时间 *	失效原因
Breizh Spirit	2011	帆	2-8 days	未知
Breizh Spirit DCNS	2012	帆	5 days-2 months	强流导致搁浅
Roboat	2012	转帆装置	1 day	强风
Erwan 1	2013	船体	4-48 days	未知
Snoopy Sloop 9 (1)	2014	龙骨和舵	1 day	强流导致搁浅
Snoopy Sloop 9 (2)	2014	舵	2 days	强流导致搁浅
Saildrone	2014	转帆装置	NA	强风
ABoat Time	2015	船体和舵	9 days	过往渔船捕获
That'll Do	2016	船体、桅杆、龙骨和舵	5-12 days	过往船只碰撞
Trawler Bait	2016	帆	16 days	过往渔船捕获
Gortobot v4	2019	帆	2 days	未知

注：\*平台被发现失效有一定的延时性

图 1-14 全球洋流分布<sup>[78]</sup>Figure 1-14 Distribution of global ocean currents<sup>[78]</sup>

### 1.4.1 无人帆船设计的航速性能评价现状

设计的航速性能评价是无人帆船航速性能相关工作的基础，在目前的无人帆船相关文献中，许多设计者仍然采用“平均航速”的概念来评价其设计的速度性能。然而对于帆船，由于其动力来自于帆上的相对风，其航速性能与风速、风向是密切相关的。因此一段较长时间的“平均”不能反应出特定设计的航速性能，也无法作为设计评价和设计间横向比较的依据。

在有人帆船设计领域，为了解决帆船的航速性能评估问题，Kerwin<sup>[79]</sup> 在1978年首先提出了以速度预测程序(velocity prediction program, VPP)这一方法来对帆船的性能(主要是航速，但姿态等也能一同得出)进行量化评价。如图1-15，VPP主要由三个部分组成：(1)描述船体和附体(龙骨、舵等)的水动力特性的模型；(2)描述帆的空气动力特性的模型；(3)平衡求解器。如图1-16，VPP的核心思路是利用求解器找到给定设计在给定的风力条件(真风速和真风角)下水动力与空气动力平衡的状态称之为稳态(steady-state)，并将其中航速最大的稳态的速度，即理想状态下多自由度达到平衡时所能达到的最大速度，作为此时的航速。VPP的输出通常以如图1-17的极坐标图的形式给出，其中极角代表真风角，不同的曲线代表真风速，极径代表该状态下的帆船航速。

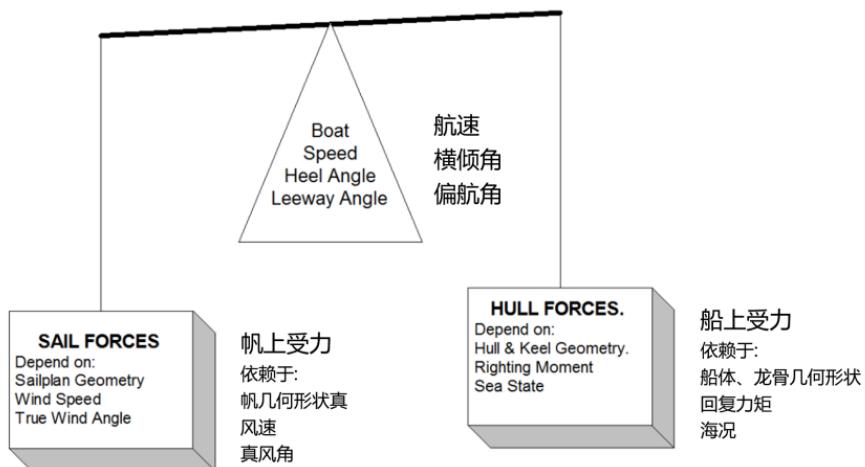


图1-15 VPP的原理示意图<sup>[80]</sup>

Figure 1-15 The schematic diagram of VPP<sup>[80]</sup>

此后，VPP成为帆船设计评价的常用工具，其作用主要有以下三点<sup>[79,83-85]</sup>：首先，VPP可以在设计阶段对特定设计进行评估，以帮助设计者改进或优化设计；其次，由于现代帆船大多被应用在体育领域中，为了确保竞赛的公平性，VPP可以帮助比赛方进行让分(handicap)规则的设置<sup>[83]</sup>，即根据选手帆船的VPP的预测性能折算其成绩，使得不同级别的帆船可以同场竞技；最后，VPP可以帮助水手

或运动员更加了解他们的船只在不同风向下的性能，以妥善地制定比赛战术，从而更为充分地利用优势风向。

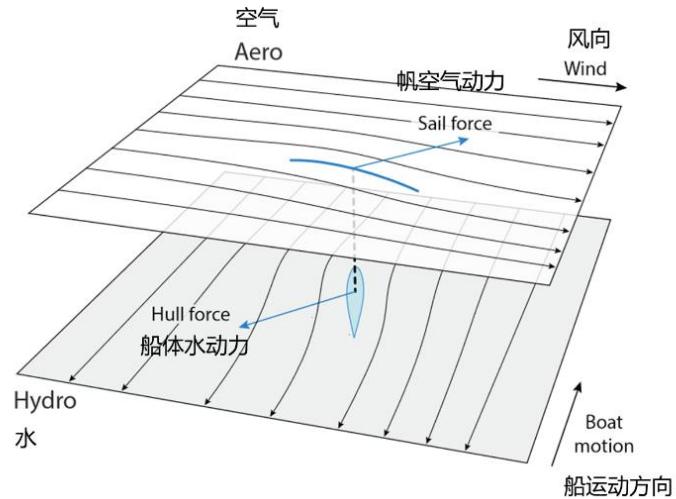


图 1-16 帆船上的水、气动力平衡<sup>[81]</sup>

Figure 1-16 Hydro- and aerodynamic equilibrium on a sailboat<sup>[81]</sup>

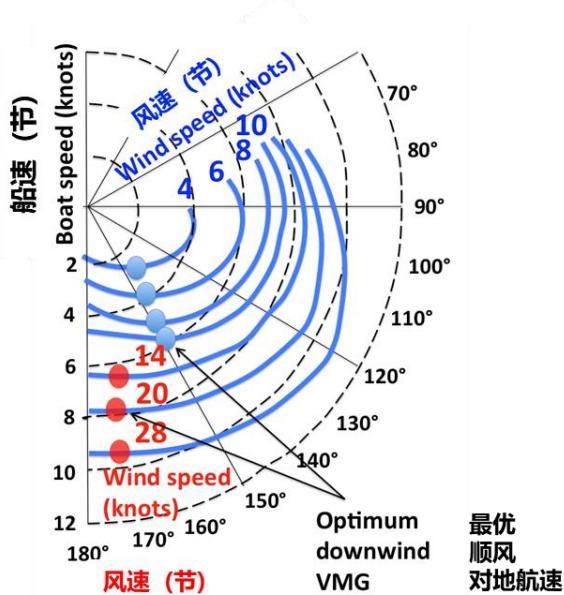


图 1-17 典型 VPP 极坐标图<sup>[82]</sup>

Figure 1-17 Typical VPP polar diagram<sup>[82]</sup>

在无人帆船领域，一些设计者也采用了VPP来对无人帆船的性能进行评价。Briere<sup>[86]</sup>提出了一个4自由度的仿真模型来预测IBOAT(软帆)的性能，以作为设计控制策略的参考。Rynne 和 von Ellenrieder<sup>[87]</sup>在Xfoil和戴尔福特系列(Delft Systematic Yacht Hull Series, DSYHS)回归模型<sup>[88]</sup>的基础上实现了一个VPP来预测无人帆船WASP的性能。其VPP中忽略了横倾对湿面积的影响，帆的攻角根据视风角是否大于135°被设置为10度或90度。Tretow<sup>[89]</sup>开发了一个基于Matlab

的 VPP 来优化无人帆船 Maribot Vane 的自平衡翼帆的设计参数。在所有真风角下, 帆攻角都被设置为 12 度, 但没有提供 VPP 的具体实现细节。USNA 的 Miller 等人<sup>[90]</sup>使用'PC Sail'(Martin 和 Beck<sup>[91]</sup>开发的基于 Excel 的 VPP, 它由 Delft 系列和标准 VPP 代码发展而来)评估了 14 艘自主帆船。然而, 没有数据可以证实其结果的准确性。Miller 等人<sup>[92]</sup>在'PC Sail'中引入了升力和阻力特性曲线来比较维京式翼帆和传统软帆的性能。

然而上述无人帆船项目中的 VPP 大多来自对现有有人帆船 VPP 的直接移植<sup>[91]</sup>, 预测精度存在较大的偏差。造成预测精度不足的原因主要有以下三点:

第一、这些 VPP 中的水动力模型大多采用的是有人帆船设计中经典的 DSYHS 回归模型。DSYHS 模型只针对特定船型, 船型参数均有适用范围, 其龙骨的形式和尺度也有相应的规定<sup>[88]</sup>。而这与面向场景与任务, 设计空间广泛的无人帆船是不匹配的。如图 1-18 所示, 用 DSYHS 母船型线与无人帆船中较为流行的纺锤形船体的型线相比较, 就可以看出其差异相当明显。与此同时, DSYHS 中各种相关参数, 比如船长、纵倾、吃水等, 在实际的应用过程中, 都需要通过复杂测定规则进行加权、折减等修正后才可以得到<sup>[80]</sup>, 这些修正规则和补贴系数来自于大量的实航数据和工程经验, 而无人帆船设计者通常无法提供这些对应的修正规则或补贴系数。

第二、大多数的无人帆船 VPP 的空气动力模型与实际情况不匹配。一些软帆无人帆船 VPP 中使用了有人帆船的软帆空气动力学模型。但有人帆船的软帆是由复杂的索具控制的, 而无人帆船通常不是, 所以有人帆船的一些形变参数是否能用在无人帆船中, 尚值得商榷。而一些翼帆无人帆船的 VPP 中空气动力由 Xfoil 计算得到。Xfoil 是基于边界层理论的计算软件, 无法计算翼型失速后的受力。而在顺风时让翼帆垂直于风, 使得帆于完全失速状态下“被风推着走”显然是一种可行的控帆策略。

第三、大多数无人帆船 VPP 采用了有人帆船相关方法中常用的基于梯度的 Newton-Raphson 求解器, 然而梯度求解器在有人帆船 VPP 中的应用是有前提的。梯度方法从理论上来讲, 是靠找到导数的零点求得目标值的, 意味着目标值只是个初值附近的极值而不一定是全局最值。在有人帆船这种设计空间集中在初始设计周围较小区域(竞赛级别要求), 又有大量比赛数据等信息提供航速先验估计的条件下, 采用梯度方法是可接受的<sup>[93]</sup>。而对于无人帆船, 面向不同应用海域和任务场景的特点使其设计间差异较大, 也难以得到对任意设计的先验航速估计。这会导致基于梯度求解器无法找到全局最优解, 进而导致导致预测值波动(图 1-19, 即连续状态的解却在航速、姿态上差别很大)。

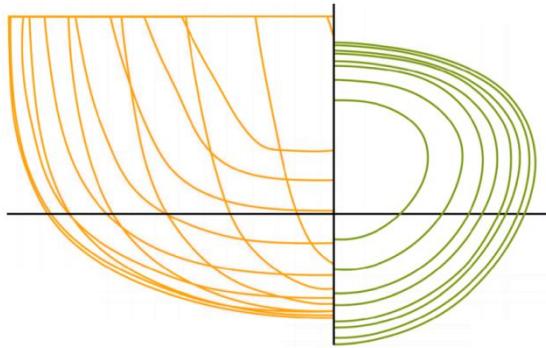
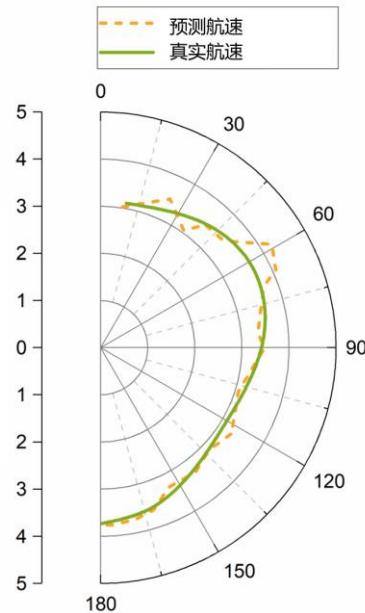


图 1-18 DSYHS 母型(左)与 A-TIRMA G2 型线(右)的对比

Figure 1-18 Comparison of DSYHS parent (left) and A-TIRMA G2 hull line (right)

图 1-19 VPP 预测值波动<sup>[94]</sup>Figure 1-19 Fluctuations in VPP prediction results<sup>[94]</sup>

#### 1.4.2 面向航速性能的无人帆船设计现状

当前无人帆船缺乏面向航速性能的相关设计工作。考虑到无人帆船工作在复杂恶劣的海洋环境中，大多数设计者都倾向于优先保证平台的抗倾覆能力，而将航速性能置于次要地位。提高抗倾覆能力的方法之一是提高船体和龙骨的提供回复力矩的能力。由于在无人帆船的设计中无需考虑船员舒适度，横摇加速度等因素<sup>[17,57,71]</sup>，设计者普遍采用更长更重的龙骨，以有效降低重心<sup>[61,67,95]</sup>，提供质量稳定性。在一些设计中，如图 1-20 所示，设计者采用超长或超重型龙骨(或二者兼备)甚至追求得到自扶正船体——即船体可在任何横倾角下产生回复力矩<sup>[57,96,97]</sup>。另一种提高无人帆船抗倾覆能力的途径是减小倾覆力矩。其中一种有效的方法是减少风帆面积。设计者在平台<sup>[98]</sup>设计中将帆面积由 4 平方米减小至 1.5 平方米。在 Beagle-B 的设计中，帆面积较其参考的有人帆船设计也减少了 40%<sup>[99]</sup>。平台

<sup>[100]</sup>也采用了比其参考的 IMOCA 级帆船更小面积的帆。此外，由于风力梯度的存在<sup>[101]</sup>(越接近海表，风速越低)，采用更加低矮的帆<sup>[73,74]</sup>或双帆<sup>[57–59,102]</sup>可以降低帆的空气动力中心，有效的降低倾覆力矩。然而，无论采用哪种方式增加抗倾覆能力，显然都会导致无人帆船航速的降低。



(a) 配备重型船体的无人帆船<sup>[24]</sup> (b) 配备低矮帆及超长龙骨的无人帆船<sup>[73]</sup>

图 1-20 提升平台抗倾覆能力不同途径

Figure 1-20 Different ways to improve overturning resistance

帆船的动力取决帆上的相对风速，而相对风速是船速的真风的矢量和，即驱动力  $F_D = f(TureWind, Speed)$ ，帆船的阻力同样取决于速度和姿态  $F_R = f(Speed, Attitude)$ ，而船速和姿态是设计在特定的阻力和动力的共同作用下的响应，即  $[Speed, Attitude] = f(Design, F_D, F_R)$ 。因此，无人帆船的设计对其性能起到决定性作用。得到一个航速性能最优的无人帆船总体设计是一项极富挑战的工作。帆船动力与速度、姿态的耦合性也决定了帆船的性能不由单一构件(船、帆、舵、龙骨等)决定。如图 1-21，更加细长的船体通常意味着更佳的阻力性能，但同时其能提供的回复力矩较小。为了在大风迎风下保证帆船不倾覆，设计者可能不得不采用更加低矮的帆。而更小的帆会削弱动力。因此换装一个更加细长的船体导致动力与阻力都被减小了，其对整体航速的影响是非常不直观的。正是因为这种复杂的耦合性，无人帆船的航速性能只能通过将船体、帆、龙骨确定后作为一个整体(在本文中称之为总体配置)来优化，而无法通过优化单一子系统(船体、龙骨和帆)来达到<sup>[103]</sup>。

由于帆船的总体设计是一项具有挑战性且高度依赖设计者理解力的设计任务。一直以来，其也是有人帆船设计，尤其是竞赛帆船设计领域中的热点研究课题之一。在传统的帆船设计中，总体设计的评估与设计迭代是基于大量昂贵且耗时的水池实验的。随着计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)仿真相关技术的蓬勃发展，基于 CFD 仿真的仿真驱动设计方法逐渐被引入有人帆船界。2013 年，Wolfson Unit 进行了由 Sailing Yacht Research Foundation 赞助的名为 Wide-Light 的项目<sup>[104]</sup>，该研究邀请了多名在 CFD 方面有造诣的研究者，他们分

别独立的采用 FINETM/Marine、FlowLogic、OpenFOAM、SHIPFLOW、Star-CCM+等主流水动力软件完成指定测试矩阵的水动力计算，并将结果与 Wolfson Unit 的水池实验结果进行对比，以验证 CFD 仿真在帆船设计领域中的可靠性。Wide-Light 的项目结果表明，商业 CFD 软件能够以较低的成本较准确地反应设计性能趋势，可以用于让分系统和设计指导。目前，在代表帆船界最顶级技术的美洲杯帆船赛中，各队也都是基于全尺寸 CFD 仿真<sup>[105]</sup>进行设计。

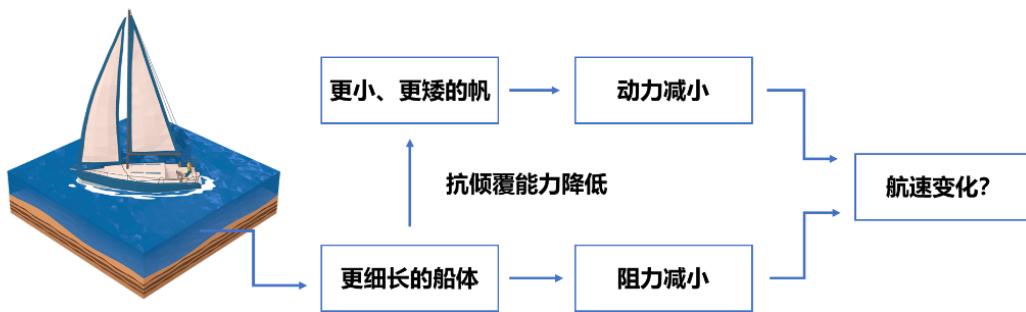


图 1-21 无人帆船航速性能与系统整体的耦合性

Figure 1-21 Coupling of the speed performance with the system itself

如图 1-22 所示，帆船的仿真驱动设计框架是一个双层循环<sup>[106,107]</sup>。对于每个总体配置，其内循环——VPP<sup>[79,83-85]</sup> 被用来获得该总体设计在(一个或几个)感兴趣的风力条件(包括真风速 TWS 和真风角 TWA)下的速度性能。然后根据其航速指标在外循环(即设计优化循环中)中迭代的调整设计参数，以获得帕累托前沿或最优设计。

与其他设计问题(如船舶或 AUV 的设计优化)相比，帆船的仿真驱动设计天然的需要更多的计算量。因为前者动力是可控的，因此对于一个设计只需一次 CFD 仿真就能获得该设计的航速。在后者中，特定设计的航速性能需要通过 VPP 来得到，而 VPP 是一个迭代求解的过程，其中需要许多次 CFD 仿真，况且外层还有设计循环。然而，计算量的问题在无人帆船设计中要比有人帆船中影响更大。究其原因，除了美洲杯等比赛具有很强的商业性质，计算资源充足外，主要是大多数对性能敏感的有人帆船是竞赛帆船。竞赛帆船受到船级别规则的限制，设计空间小，而且有许多比赛数据来提供航速、姿态等先验性能估计。因此，如图 1-23 所示，其优化过程只需要在有限的设计空间中，通过对每个设计的航速先验估计附近进行集中的几次仿真进行采样，进而构建不需要更新的离线空气动力和水动力代理即可<sup>[93,108,109]</sup>。可是，对无人帆船来说，特定的任务场景、目标海域、载荷要求、“非标准”的船体和龙骨以及尺度效应<sup>[110,111]</sup>使得设计者很难给出一个合适的起点，也难以给出一个较准确的先验性能估计。如果采用离线代理来进行优化，则需要大量的 CFD 仿真以覆盖整个高维空间，来为每个设计构建一

个准确的全局模型。考虑到单次 CFD 仿真可能需要几个到十几个小时，这种所需采样数上的“维度灾难”带来的计算成本和时间显然是工程上难以负担的。

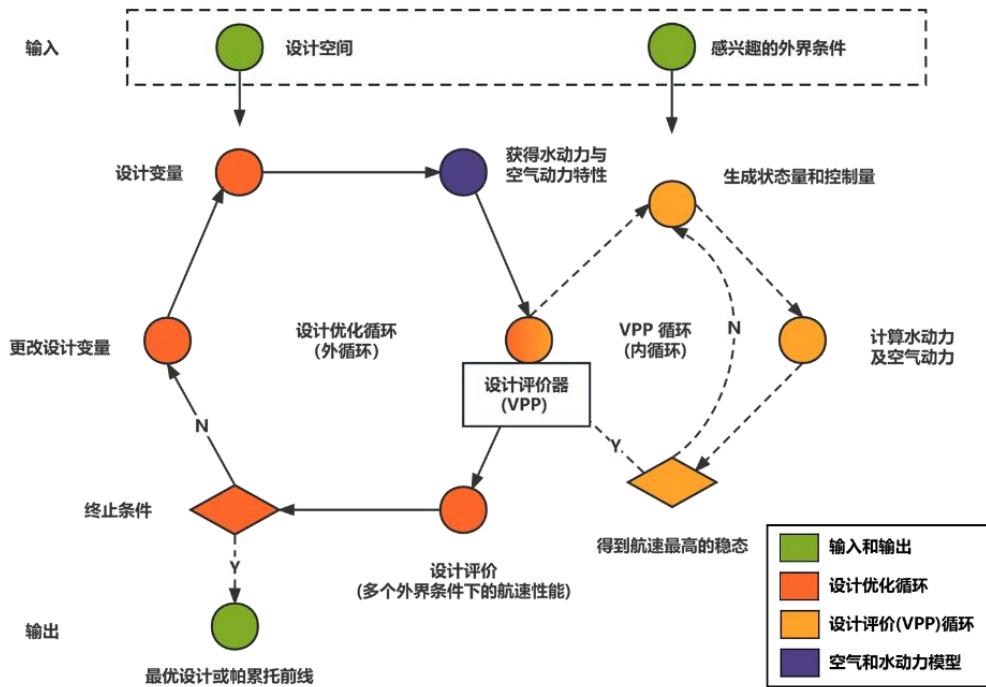


图 1-22 帆船仿真驱动设计框架

Figure 1-22 General configuration optimisation framework for a typical sailboat

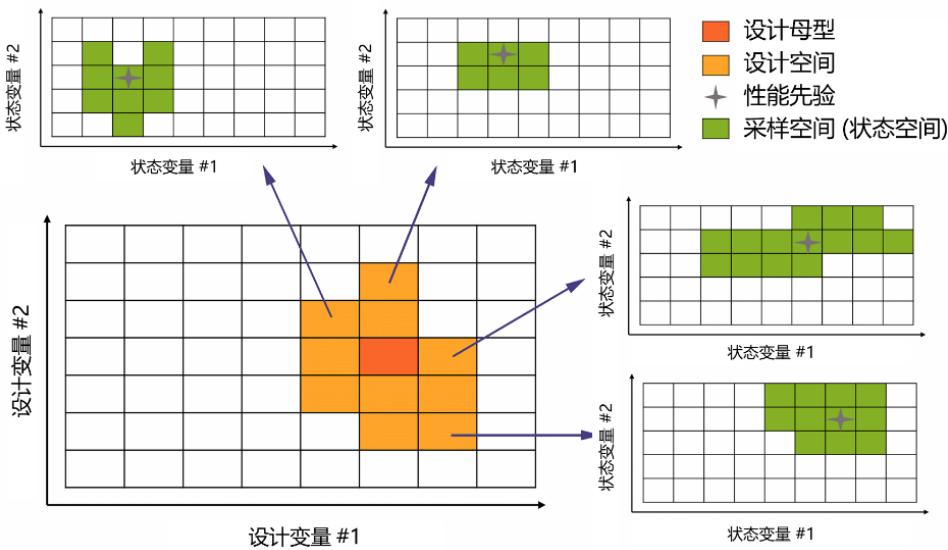


图 1-23 有人帆船(赛艇)仿真驱动设计采样示意图

Figure 1-23 Schematic diagram of samplings of general configuration optimisation of a crewed racing sailboat

## 1.5 本文的主要研究内容

在过去的二十年中,研究者和设计者共同努力已经使无人帆船成为海洋观测的有效工具。在适当的设计和控制策略下,若排除和规避意外事件的侵扰(过往船舶的干扰、严重碰撞造成的损坏、极端恶劣的天气等),自主帆船可以航行数十天甚至数百天<sup>[18-20,22,30]</sup>,并完成了跨越大西洋<sup>[23]</sup>和绕南极航行<sup>[74]</sup>等里程碑式的任务。因此,目前无人帆船的耐久性、能源自持力和抗倾覆能力已不是制约无人帆船性能的主要因素。

当下,无人帆船最主要的性能短板和提升空间集中在其航速性能上。较低的航速导致其海洋观测任务效率和区域通过性的降低,并且当前学界对于包括航速性能评价、设计和优化方法的等关涉到无人帆船航速性能的研究、探讨相对较少。为了解决无人帆船的航速制约,提升无人帆船在海洋观测时的表现和效率,为该类平台的后续发展、改进提供必要的理论基础和技术储备,本文围绕无人帆船航速性能提升制约因素与对策分析、无人帆船设计的航速性能评价方法、面向无人帆船航速最优的设计方法和面向无人帆船航速提升的增稳机构优化设计研究开展研究。全文内容安排如下:

**第1章:绪论。**这一章阐述了无人帆船对于海洋观测的意义,介绍了无人帆船的发展历史,并从结构耐久性、能源自持力、抗倾覆能力和航速性能等四个海洋观测关键性能的现状出发,指出了航速性能是当前无人帆船的性能短板。通过对无人帆船航速性能评价现状和面向航速性能的无人帆船设计现状的介绍,指出了现有研究在无人帆船航速相关问题上的不足与所面临的核心挑战,表述了本研究的知识背景,并为后续的研究打下了坚实的基础。

**第2章:无人帆船航速性能提升制约因素与对策分析。**这一部分从“设计者通常将航速性能置于抗倾覆能力考虑之后”这一现状出发,以长度/排水量比、长宽比、帆面积/排水量比、压载比四个无量纲数作为衡量标准,系统地对现有无人帆船设计在航速性能与抗倾覆之间的权衡情况进行了量化评价,展现了当前无人帆船设计中在航速性能与抗倾覆之间的权衡中过度偏重于后者的现状。结合无人帆船设计现状,对无人帆船航速性能提升的制约因素进行了分析,并给出了相应对策,即一方面,利用水动力仿真和仿真驱动优化技术找到航速性能与抗倾覆能力尖锐对立下的二者最优权衡;另一方面,提高无人帆船抗倾覆能力的环境适应能力,以缓和尖锐对立,进而间接提高航速性能。两种解决方案的提出为后续研究的开展提供了理论背景和核心逻辑。

**第3章:无人帆船设计的航速性能评价方法研究。**针对无人帆船设计中缺乏先验航速估计和设计空间大的特点,本研究设计了一种基于水动力仿真和优化求解器的通用无人帆船航速性能量化评价方法。该方法以计算流体力学仿真替代经验公式,提高了通用性,使得其能对任意无人帆船设计进行评价;采用改进遗传

算法求解器实现了在缺乏先验航速估计下的准确航速估计。本研究设计了一种基于邻域信息的优化策略，可以利用相关状态间的自然关联性，将相关状态进行关联求解，提高了航速估计的效率和精度。为后续的设计评价和航速性能优化工作提供助力。

**第4章：面向航速最优的无人帆船设计方法研究。**针对无人帆船设计中高航速性能与抗倾覆能力矛盾对立的问题，本章提出了一种基于贝叶斯优化和知识迁移的无人帆船仿真驱动设计方法，提升了优化工程中无人帆船水动力和空气动力建模效率，实现了过程设计结果的信息复用，解决了仿真驱动设计方法应用在无人帆船设计中时因设计空间大、缺乏先验航速估计导致的采样数“维度灾难”。设计实例证明，本方法可以极大地减少仿真驱动设计所需的仿真次数。从而有助于在航速性能与抗倾覆能力的尖锐对立中进行系统性的权衡优化工作。

**第5章：面向无人帆船航速提升的增稳水翼优化设计研究。**面向无人帆船的抗倾覆能力无法随环境变化，继而制约其航速性能的进一步提高这一现状，本研究分析了多种能够提供动态抗倾覆能力的环境自适应机构与无人帆船的适配性，指出了被动水翼是最适合无人帆船的环境自适应机构。类比船舶领域中“支撑三角型”的概念，本研究建立了基于“稳性三角形”的被动水翼无人帆船设计评估模型，设计了一型被动水翼无人帆船方案，并对不同展弦比的水翼的增稳、增阻规律进行了分析，评估了被动水翼对无人帆船的增速效能。本章对利用增稳水翼缓和航速性能与抗倾覆能力的尖锐对立之功效进行了初步探索，很大程度上证实了以这一机构间接提升航速性能的路线具有可行性，为该类平台的后续研发和设计提供了基础。

**第6章：总结与展望。**总结了本研究的主要工作和创新点，并对未来的研究工作进行了展望。

## 第 2 章 无人帆船航速性能提升制约因素与对策分析

### 2.1 引言

从实际航行表现上来看，目前无人帆船最大的性能瓶颈在于其航速性能。然而，无人帆船研究社群对航速性能相关的研究和讨论尚存在空白。为了提高无人帆船的海洋观测效率和区域通过性，有必要对当前制约无人帆船航速性能进一步提升的主要因素进行识别，并通过分析，提出相应的对策，为后续的工作提供路线和理论指导。

本章第 2 节对当前无人帆船设计中的航速性能与抗倾覆能力进行了量化评价。第 3 节深入分析了制约无人帆船设计航速性能进一步提升的三个因素；第 4 节结合无人帆船设计问题特定提出了提高无人帆船航速性能的两种对策。第 5 节对本章研究进行归纳总结。

### 2.2 无人帆船设计中航速性能与抗倾覆能力的量化评价

如前文所述，在目前的无人帆船设计中，设计者采用了各种方式提高无人帆船的抗倾覆能力，包括减小帆面积，降低帆高度，采用高稳性的较重船体等，而这些举措显然是削弱了平台航速性能。虽然将抗倾覆能力放在更高优先级的位置上是合理的，但是，无人帆船的抗倾覆能力设计并没有公认的适用标准。这可能会造成不合适的二者权衡。在实践中，设计者通常根据平台的应用场景和目标海域设定一个风速阈值，以确保平台具备足够的抗倾覆能力。例如，Avalon<sup>[67]</sup>的设计标准是可承受爱尔兰海岸附近 50 节的风速和 9 米高的浪。其他的一些平台的抗倾覆能力是根据海试结果或工程经验来调整得到的<sup>[112]</sup>。此外，鲜有文献对航速性能与抗倾覆能力之间的合理折衷加以讨论，大多数对二者权衡的处理是高度依赖于个人理解的。

由于当前并没有单一指标可以客观的、定量地反映无人帆船抗倾覆能力和航速性能，本文引入四个无量纲数，全面和定性地审视现有设计中二者的权衡情况。首先，前两个无量纲数是长度/排水量比(LDR)和长宽比(L/B)<sup>[110]</sup>。一般来说，更长、更窄和更轻的船体具有更高的速度潜力，而反之可以提供更多的形状和质量稳定性。其次，帆面积/排水量比(SA/D)<sup>[113]</sup>描述了平台的功率/负载比，类似于车辆的推重比，值越大快速性越好，反之则在恶劣的环境中将产生更小的倾覆力矩。由于翼帆和软帆的典型升力系数非常相似<sup>[114]</sup>，因此仅考虑“动力”这一特性时，我们将 SA/D 同等的应用于软帆和翼帆。最后，我们引入压载比(B/D)，即龙骨占总重量的百分比。高压载比会增加船体吃水，降低速度潜力，但会显著的强化抗倾覆能力。对现有能收集到的数据较完整的 57 艘无人帆船的统计如表 2-1。

**表 2-1 基于无量纲数的现有设计统计**  
**Table 2-1 Statistics for existing designs based on dimensionless numbers**

文献	平台	船长(m)	排水量(kg)	LDR	L/B	SA/D	B/D
[33]		1.0	4.5	6.2	4.2	13.4	
[32,34]	Atlantis†	7.2	150	13.6	2.4	27.5	50%
[58,61]	AROO	1.5	12	6.6		4.5	29%
[115]	Robbe Atlantis	1.4	17.5	5.3	4.1	12.7	63%
[95,116]	FASt	2.5	50	6.8	3.7	27.3	40%
[98]	IBOAT	2.4	35	7.3	6.0	14.0	40%
[97,114,117]	WASP	4.2	275	6.5	5.3	10.6	82%
[67]	Avalon†	4.0	440	5.2	2.8	6.9	36%
[57]	A-Tirma G2	2.0	43	5.7	4.1	1.9	
[118]	AAS Endurance	3.8	300	5.6		10.0	20%
[99]	MOOP	0.7	4	4.5		0.3	
[119]	FHsailbot	1.5	15	6.2	4.6	10.7	
[119]	Saudade	1.1	9	5.4	4.3	12.0	
	Breizh Spirit1	1.5	13	6.4	4.3	15.5	
[60]	Breizh Spirit2	2.3	55	6.0	2.9	13.8	
	Breizh Spirit3	1.7	13	7.2	3.8	13.6	
[7]	ASV Roboat	3.7	300	5.6		12.0	20%
[69]	SOA	1.9	52.2	5.0	5.6	13.6	
[69]	W2H	1.9	44	5.2	3.9	14.4	
[64,120]	Marius	2	70	4.9	2.5	17.1	50%
[121]	A-Tirma	1	4.3	6.1	4.1	23.1	
[21]	SailBuoy	2	60	5.1	4.0	6.5	
[63]	ARRTOO Prototype*	1.95	29.5	6.3	4.1		
[18,22]	Saildrone‡	7	750	7.7	2.7	6.1	
[122]	Zarco ASV*†	2.5	50	6.8			
[25]	Sea Quester	1.9	25.5	6.6	6.5	30.8	43%
[24]	MaxiMOOP	1.2	23	4.2	3.4	12.4	
本文	Seagull	3.45	155	6.4	2.9	4.1	20%
[123]		1.9	20	7.0	9.5		15%
[124]		1.5	15	6.1	3.2	18.9	
[76]	SOTAB-II	2.6	150	5.0	3.5	2.0	20%
[125]		1	6	5.5		7.3	5%
[65,66,126]	ASPIRE	4.2	370	5.8		4.0	47%
[70]	Maribot Vane	4.2	280	6.4	5.3	7.0	
[75]	Submaran S10*	4.14	127	8.2			
	Datamaran*†	2.5	85	5.7	1.5		
[36]	Breizh Spirit DCNS	1.40	13	6.0	2.5		
	Snoopy Sloop 8	1.20	14	5.0	4.3		
	Snoopy Sloop 11	1.33	14.6	5.4	4.6		
	Erwan 1	3.65	300	5.5	4.2		
	ABoat Time	1.20	18	4.6	3.4		
	That'll do	1.40	10	6.5	3.0		
	Gortobot v3	1.81	8.1	9.0	3.5		
	Breizh Tigresse	1.44	28	4.7	2.4		
	OpenTransat (2016)	2.36	45	6.6	3.3		
	OpenTransat (2019)	2.00	47	5.5	6.3		
	Gortobot V2	0.79	5.4	4.5	2.5		
	Phil's Boat	0.85	7	4.4	3.3		
	That'll Do Two	1.40	10	6.5	1.8		
	SeaLeon	1.80	50	4.9	3.6		
	EC-Crossing	1.05	10	4.9	4.8		
	Brave Puffin	1.80	22	6.4	9.0		
	Bearly Assailable	1.20	26	4.1	3.3		
	Endeavour	1.05	10	4.9	4.8		

表 2-2 基于无量纲数的现有设计统计(续表)

Table 2-1 Statistics for existing designs based on dimensionless numbers(continued)

文献	平台	船长(m)	排水量(kg)	LDR	L/B	SA/D	B/D
[46]	Pinta	2.95	450	5.6	2.5		
	Saildrone Surveyor‡	22	12700	9.4		7.5	

注: \* 帆-桨混动平台; † 双体船; ‡ 采用单体模式时

$$SA / D = \frac{\text{Sail area}}{\text{Volume of displacement}^{\frac{2}{3}}} \quad LDR = \frac{\text{Waterline length}}{\text{Volume of displacement}^{\frac{1}{3}}}$$

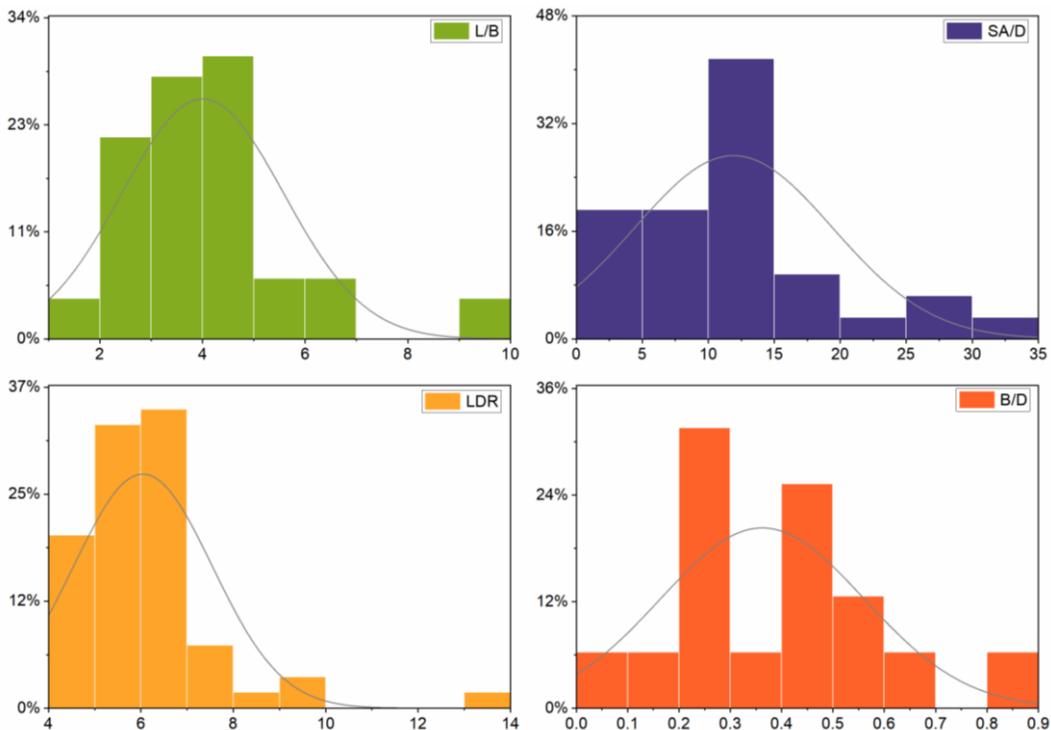


图 2-1 现有设计的相关无量纲数频次分布直方图

Figure 2-1 Frequency distribution histograms of dimensionless numbers for existing designs

如图 2-1 所示, 从数值上看, LDR 和 L/B 和的分布相对集中, 表现出了无人帆船设计社群的共识。L/B 集中在 4 左右, LDR 集中在 6 左右。从船舶快速性的角度来看, 属于肥大型船体, 其速度潜力一般但能提供大量的形状稳定性及质量稳定性。SA/D 大多低于 15, 在有人帆船的分类标准中这属于典型的慢速帆船<sup>[113]</sup>。B/D 的分布相当分散, 反映出设计者对该参数没有达成共识, 但其中值达 40%, 甚至有不少平台具有极高的压载比, 这表现出了设计者对质量稳定性极度偏重。统计数据清晰地表明当前无人帆船航速性能方面的设计群像——设计间差异大、设计者在航速性能相关的核心参数上缺乏共识, 但共同特征是设计者在抗倾覆能力与航速性能的权衡中偏重于前者。

## 2.3 无人帆船设计中的航速性能提升制约因素分析

从表象上看，无人帆船的航速性能受到抗倾覆能力的制约——大多数设计者将抗倾覆能力置于更高的优先级，而导致了航速性能的削弱，且二者间的权衡没有取得很好的折衷。结合无人帆船及其设计问题特点，造成这种现状的原因是：首先，无人帆船抗倾覆能力无法随环境变化导致无人帆船的航速性能和抗倾覆能力陷入一种尖锐对立；其次，无人帆船抗倾覆能力普遍缺失导致设计者在二者的权衡中对抗倾覆能力极度偏重；最后，航速性能相关的无人帆船设计资料、资源匮乏使得无人帆船设计者难以找到更加优化的航速性能与抗倾覆能力的平衡点。

### 2.3.1 抗倾覆能力无法随环境变化

船员、尤其是帆船船员，是高度专业化的职业。船员可以被视为是有人帆船上最重要的组成部分。除了进行决策和维护外，船员也可以显著的影响帆船的性能。第一、船员可以改变在不同风况下帆产生的倾覆力矩。在帆船的实际航行中，不同的风速风况下最合适的帆配置不是一成不变的，船员不仅会根据不同风况及时调整帆的角度和状态，还会及时对帆的配置进行更变。图 2-2 展示了 IMOCA60 级帆船的 10 种常规(随船携带的)帆配置<sup>[127]</sup>。对具体的帆配置进行介绍和讨论过于专业，超出了本文的范畴。但是直观上可以看出，不同配置间的帆面积变化非常大(实际上配合主帆的副帆面积从  $25m^2$  到  $440m^2$  不等)。帆面积的巨大变化幅度无疑对应了性能上巨大的变化。这种性能的巨大变化能力保证了在船员的帮助下，几乎任何环境下帆船都有足够大的帆面积产生充足的动力，同时帆上产生的倾覆力矩不会超过其极限承受能力。

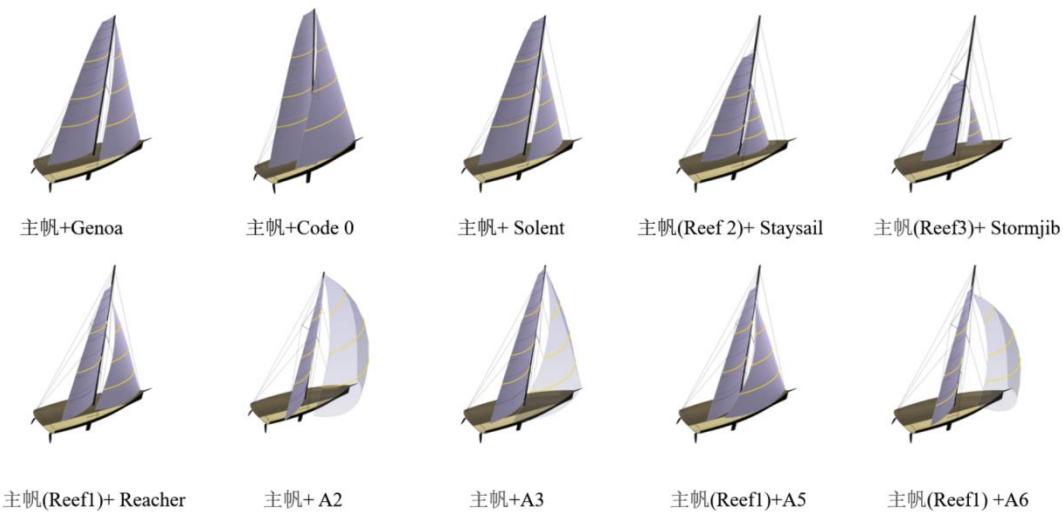


图 2-2 IMOCA60 级帆船的 10 种常规帆配置

Figure 2-2 Regular sail configurations for IMOCA 60 class sailboats

第二、船员作为在船上可以自主移动的质量，对帆船的稳定性也十分重要。在航行中船员通常会移动到上风侧，利用自身的体重来抵消部分倾覆力矩，称之为

压舷(hiking)。在一些竞赛帆船中，如大部分的小帆船中和图 2-3 中的 Libera 级帆船，安装了一些帮助压舷的装备，包括吊索(trapezes)和压舷杆(leech pole)等，来进一步增加船员提供的回复力矩的力臂。在这些帆船上，由于倾覆力矩的绝大部分都由船员的体重抵消，其甚至没有重型的龙骨，只有轻型的稳向板来抵消侧向力。压舷带来的稳定性动态调整能力使得帆船在采用更加轻快的船体和装备更大面积的帆，从而具备更高的速度潜力。



图 2-3 Libera 帆船的船员在进行压舷<sup>[128]</sup>

Figure 2-3 Hiking by the crew of the a Libera class sailboat<sup>[128]</sup>

在无人帆船平台上，综合考虑到机构的耐久性和能耗方面的问题，尚没有可靠的机制能模拟人类水手换帆及压舷的行为，或达到类似的效果。这意味着无人帆船的环境适应性受到了极大地削弱。换言之，无人帆船需要用一个相对固定的配置和性能来面对多变的海洋环境。这使得在无人帆船设计中航速性能和抗倾覆能力二者被尖锐地对立起来，陷入此消彼长的尖锐对立中。进一步来讲，由纵帆船顺、迎风不同的航行机理可以发现，帆船顺、迎风性能对设计的要求是不同的：在迎风情况下，帆船需要较强的抗倾覆能力来抵抗与驱动力共生的倾覆力矩；而在顺风时，由于船是被风“推着前进”的，故而对抗倾覆能力和侧向力的要求很低，文献<sup>[129]</sup>指出在与真风夹角 130-150 度的范围内，即使没有龙骨来抵抗侧向力，帆船也能正常航行。因此，无人帆船设计者按照最恶劣天气条件(大风)和最严苛状态(迎风)下的抗倾覆能力来设计的、无法根据外界环境变化而做出动态的、反馈性的性能改变的平台，在一般情况下其航速性能将不可避免地受到削弱。图 2-4 展示了南极特化版的 Saildrone 无人帆船，考虑到南极洲的条件，特化版 Saildrone “不可避免地要优先考虑抗倾覆性，以确保生存能力”，因此采用了低矮的帆而不是标志性的细长帆<sup>[74,130]</sup>。显然这种配置如果在风力较弱的一般海域航行时航速性能将会较标准配置大幅降低。综上，无人帆船的抗倾覆能力无法随外界变化限制了无人帆船航速性能的进一步提升。



图 2-4 南极特化版 Saildrone<sup>[74,130]</sup>  
Figure 2-4 The Antarctic specialised version of Saildrone<sup>[74,130]</sup>

### 2.3.2 抗倾覆能力普遍缺失

船员对帆船的海上航行安全负责，当发生紧急情况时，船员需要依照相关海事规则进行处置。当发生事故时，船员将按照法规承担相应的责任。不同于有人帆船的行业规范与操作惯例，尽管工程师们可以声称无人帆船是“智能”和“安全”的，或将无人帆船定性为一种特定的“浮标”而不是“船舶”<sup>[98,131,132]</sup>，但其事实上其对过往船只造成潜在的海上航行安全风险是毋庸置疑的<sup>[120]</sup>。无人帆船所面临的这种“安全风险责任”问题是自治系统(如无人驾驶等)普遍面临的伦理挑战。目前在无人帆船研究社群的实践中，为了规避这一问题，普遍做法是将无人帆船的总体尺度(长度和排水量)限制在一定范围内。在文献中关于总体尺度的选取通常没有给出理由，更像是一种“约定俗成”的习惯，而不是精确计算的结果。图 2-5 统计了 50 余艘现有的无人帆船的主尺度分布。可以看出大多数的无人帆船的长度(总长或水线长)都集中在 2.4m 或 4m 两档附近。排水量通常较小，普遍在 200kg 以内。本文认为这两个基准值受到了 Mircotransat 的较大影响，在 2017 年之前，Mircotransat 允许参赛的最大船长为 4m，2017 年后降至 2.4 米。由于平台稳定性随主尺度的减小急剧减小<sup>[133]</sup>，普遍较小的总体尺度也意味着无人帆船的在稳定性方面存在普遍性的不足。

目前大多数无人帆船平台缺乏系统的设计方法，大多设计是以已有的遥控模型(RC, <3m)<sup>[61,121,134]</sup>，小帆船 (Dinghy, 3-5 m)<sup>[68,120]</sup>，和远洋帆船(Yacht, >5m)<sup>[58,97]</sup>作为设计起点直接改装、进行缩比或微调得到的(表 2-2)。然而采用这种方法设计无人帆船时存在一个共性问题——抗倾覆能力不足：RC 模型的设计目标场景是在平静水域中进行竞速比赛，其细长的船体设计更偏重快速性而不是抗倾覆能力。在小帆船设计中，船员的重量被计入了稳定性(压舷)，因此小帆船通常采用较轻的龙骨，甚至只有稳向板，而这和无人帆船的实际使用场景相去甚远。远洋帆船具有良好的抗倾覆能力，但无人帆船设计中常用的直接按比例缩小尺度的方法会导致稳定性被极大削弱。虽然回复力矩和倾覆力矩都随着尺度的减小而减小，但回复力矩的减小更快<sup>[110,133]</sup>。

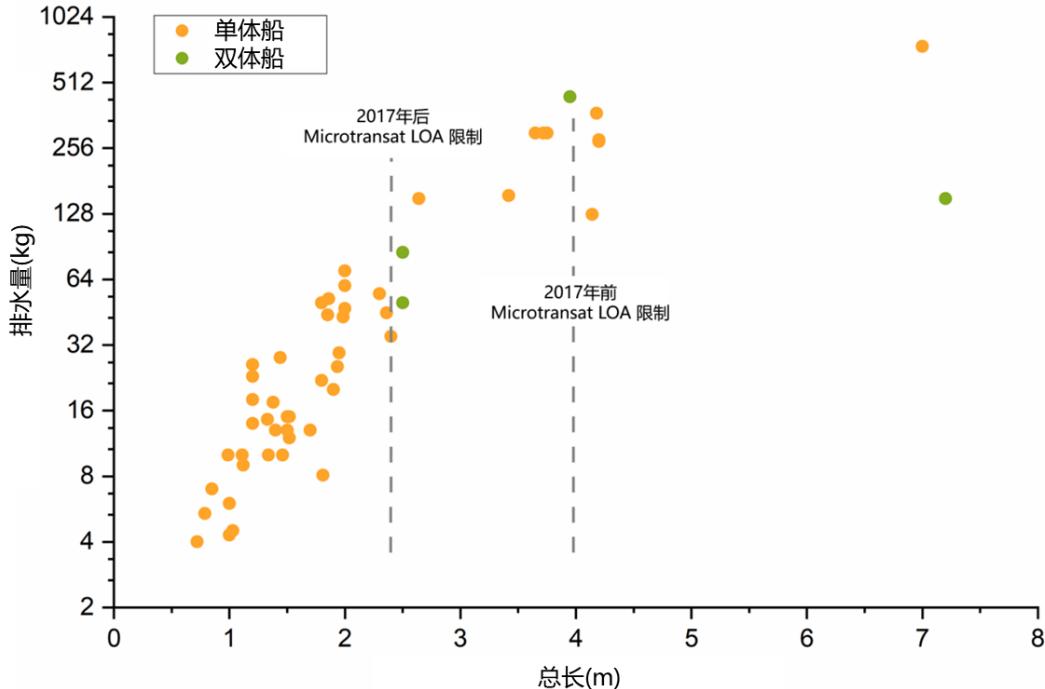


图 2-5 部分无人帆船平台的长度、排水量统计图

Figure 2-5 Length and displacement statistics of selected autonomous sailboats

表 2-3 无人帆船设计参照统计表

Table 2-2 Design reference statistics of selected autonomous sailboats

RC 模型	小帆船	远洋帆船
AROO	WASP	Platform in [33]
ARC	VAIMOS	That'll do
Fhsailbot	ASPIRE	Atlantis
Saudade	Erwan 1	Platform in [125]
Aeolus	AAS Endurance	HWT-X1
Platform in [96]	Beagle-B	SOTAB-II
	ASV Roboat	Robbe Atlantis
	Pinta	FASt
		Platform in [135]

综上，出于海上交通安全考虑，采用较小的主尺度和缺乏系统的设计方法导致了无人帆船的在抗倾覆能力上的天然缺失。因此无人帆船设计者不得不留出更多的“安全系数”来确保抗倾覆能力，以保证平台在面对恶劣的海况之时仍有安全余量。这导致设计者在航速性能和抗倾覆能力的尖锐对立中更加偏重于后者，设计出了更重的船体、更长的龙骨和更低矮的帆，这种设计权衡无疑限制了无人帆船航速性能的进一步提升。

### 2.3.3 设计资料、资源匮乏

目前无人帆船研究社群缺乏对面向航速性能的设计优化方法的研究。有限的

一些优化工作通常是基于个人理解、实航表现<sup>[112]</sup>、或是通过VPP对离散设计进行比对<sup>[69,70,87,92,136]</sup>得到的。这种设计优化工作缺乏系统性的现状，究其原因，主要是因为无人帆船设计资料、资源的匮乏。

在设计空间方面，出于对比赛的公平性以及安全问题考虑，有人帆船设计都受相应的级别规则和安全法规的约束。这意味着有人帆船可以由一个近似相同的母型开始设计，其设计空间被局限于相应级别规则或安全法规所限定的较小范围内。而对于无人帆船，其设计约束是完全面向应用场景的。这些应用场景涉及到诸如进行长期观测，水声调查，水团追踪等不同的任务，亦会被设定在诸如近海、远海、极区等不同的航区。不同的要素组合将带来不同的任务要求，不同的传感器配置和工作环境需求，以及不同的海况适应性等。这意味着无人帆船设计目标非常多元化，拥有很大的设计空间，但是，从另一个角度来说，这也意味着设计者难以找到合适的设计起点和参考对象。在先验性能估计方面，有人帆船的运动和商业属性使得有大量的竞赛、实航数据可以为设计初始阶段提供先验性能估计，并且可以利用已有的评级系统<sup>[137]</sup>对不同设计进行性能估计。而对于无人帆船，由于设计的任务场景、所搭载的载荷和目标海域的不同，设计间交集较小，这些特点使得设计者很难在设计的初始阶段根据已有的无人帆船性能来对性能进行先验估计，现有的有人帆船评级系统也不适配无人帆船设计。这两方面设计资料的匮乏共同造成了无人帆船设计者难以在设计初期把握航速性能与抗倾覆能力权衡。

如1.4.1节中所述，目前大多数无人帆船设计工作中采用的多是基于有人帆船的水动力、空气动力模型来估计相关受力。这些模型在船体形状、尺度范围、附体形状、帆的形式与结构等方面均有具体的适用范围，且需要来自于工程经验的补贴系数修正，与无人帆船并不适配。文献<sup>[138]</sup>指出，目标设计的空气和水动力模型准确性会显著的影响设计的航速性能评价与后续优化工作。为了得到精确的水动力与空气动力模型，需要利用水池或水动力仿真等手段对无人帆船进行建模。然而，无人帆船与有人帆船不同，无人帆船的设计工作不具备很高的商业或竞技体育价值，而且通常为面向特定任务场景和特定海域的一次性(ad-hoc)设计，大多不会根据一个设计制造多艘系列帆船，因此所能投入的设计资源有限。

综上，无人帆船设计目标多元化、设计空间大、设计间交集小的特点使得设计者难以找到合适的设计起点和设计参照。而一次性设计的属性使得无人帆船设计工作难以获得充足的资源对特定设计的水动力和空气动力进行精确建模。设计资料和资源的匮乏导致了无人帆船设计者难以在抗倾覆能力的权衡中找到更优折衷，限制了无人帆船航速性能的进一步提升。

## 2.4 无人帆船设计中的航速性能制约对策分析

针对上述问题，为提高无人帆船的航速性能。本文提出以下两项可行对策：

(1)利用计算流体力学仿真与仿真驱动设计技术寻求航速性能与抗倾覆能力在尖锐对立下的最优权衡。

无人帆船的航速性能与抗倾覆能力的尖锐对立关系是客观存在的，一种可行的解决方案是要寻求航速性能与抗倾覆能力在尖锐对立下的最优权衡。这包括两方面的研究，一方面，要给出一个通用性、较精确的无人帆船航速性能量化评价体系。目前，该方面工作的不足，导致了设计者难以对设计进行横向比较，而这种横向比较是性能优化工作的基础。考虑到无人帆船多为一次性设计，因此采用传统的基于系列模型水池试验对设计进行评估的方法是昂贵且不明智的。在这种情况下，基于计算流体力学相关方法是合适的。CFD 仿真成本低、通用性强。有人帆船设计案例<sup>[104]</sup>显示，商业 CFD 软件可以捕捉到设计参数对性能的典型影响，而不需要过高的网格密度。然而，无人帆船设计所能投入的资源相对较少，其面临的主要挑战仍是要在保证评估精度的条件下，尽量减少相关的计算代价。

另一方面是要给出一个面向航速最优的无人帆船设计方法。帆船依赖相对风推进的特点决定了其航速性能与设计高度相关，而系统的复杂耦合性导致得到一个合理的设计的挑战性非常大。当前大多数无人帆船的设计是依赖于个人理解的，缺乏系统的设计方法，因此需要给出一个系统的设计优化方法，以在航速性能和抗倾覆能力的对立中找到最优权衡。仿真驱动设计(SBD)<sup>[139]</sup>是一种基于计算机仿真和分析的设计方法，它使用计算机仿真技术(在本文中是 CFD 仿真)来预测和评估设计方案的性能，以便对设计进行优化和改进。采用仿真驱动技术可以将这种一次性设计问题转化为基于 CFD 设计评估的优化问题。仿真驱动设计可以以较低的成本对较大的设计空间进行多轮探索和迭代，特别适合无人帆船这种设计资源有限的一次性设计任务。然而，考虑到无人帆船设计空间大，难以获得先验性能估计的特点，应用仿真驱动设计在利用 CFD 获得空气动力和水动力模型时可能会面临“维度灾难”导致计算量工程上难以承受。

(2)提高无人帆船抗倾覆能力的环境适应性，以寻求缓和航速性能与抗倾覆能力的尖锐对立。

无人帆船的抗倾覆能力缺乏在环境骤变下的快速应变机制即环境自适应能力，这是无人帆船的航速性能与抗倾覆能力间尖锐对立的根源。虽然当前在某些无人帆船上设有一些能够应对极端条件的机制，比如 Datamaran 的主动自动扶正系统(图 2-6)或 Submaran 的可收放翼帆(图 2-7)，但是，上述两种装置启用之时，将使得无人帆船丧失全部动力，因此两者与其说是抗倾覆能力的应变机构，更不如说是一种“紧急避险”的措施。无人帆船真正需要的是能够根据环境动态调整的抗倾覆能力(包括倾覆力矩和稳定性)。一旦无人帆船的抗倾覆能力可以随环境动

态调整，那么无人帆船将不再必须以一种“固定配置”来面对多变的海洋环境，设计者将不再必须设计一个极小的帆和极重的船体来应对最恶劣的外界环境。这将极大的提升综合航速性能。



图 2-6 Datamaran 的主动自扶正系统<sup>[40]</sup>

Figure 2-6 Self-righting system on Datamaran<sup>[40]</sup>



图 2-7 Submaran S10 的可收放帆<sup>[75]</sup>

Figure 2-7 The retractable wing sail of Submaran S10<sup>[75]</sup>

值得注意的是，诸如广义可变面积帆、变种帆、增稳机构等(将在第五章中具体介绍)许多在有人帆船或者其他海洋平台上应用的技术，可以有效地提高相应平台的环境适应能力。加强对上述装置的探索和利用，有助于帮助改善乃至解决无人帆船航速性能与抗倾覆能力之间的对立，从而使无人帆船摆脱只能用一个固定配置去应对变化莫测的海洋环境的设计困局，提高航速性能。

## 2.5 本章小结

本章首先从设计者通常在设计中“重抗倾覆能力”“轻航速性能设计”这一现状出发，引入四个无量纲数，对无人帆船设计中的航速性能与抗倾覆能力进行了量化分析。结论表明设计者在抗倾覆能力与航速性能的权衡中偏重于前者。其后，本章通过深入地分析，指出了抗倾覆能力无法随环境变化这一弊端，使得无人帆船必须以一个相对固定的性能来面对多变的海洋环境，并使无人帆船设计中

航速性能与抗倾覆能力尖锐对立起来。在目前的无人帆船设计中，采用较小的主尺度和缺乏系统的设计方法导致了现有平台普遍的抗倾覆能力不足，使得设计者不得不重视抗倾覆能力设计，并为之而让渡、乃至牺牲部分航速性能。此外，无人帆船设计资料、资源的匮乏加剧了这一现状，使得设计者无法找到二者间的更优权衡。最后，针对以上情况，本章通过分析提出了两条对策：第一、利用计算流体力学仿真与仿真驱动设计技术寻求航速性能与抗倾覆能力在尖锐对立下的最优权衡；第二、提高无人帆船的抗倾覆能力的环境适应性，以寻求缓和航速性能与抗倾覆能力的尖锐对立，希图以此间接提高航速性能。在某种程度上，本章梳理和揭示了本研究后续章节得以开展的前提条件和逻辑起点，为后续章节的论述和实证提供了理论和逻辑基础。

## 第3章 无人帆船设计的航速性能评价方法研究

### 3.1 引言

无人帆船的航速性能的评价是进行航速性能优化工作的基础。目前，如1.4.1节相关现状和第二章的深入分析所述，大多数无人帆船设计的航速性能评价是通过移植有人帆船速度预测程序(Velocity Prediction Program, VPP)来实现的。有人帆船VPP在应用于无人帆船航速性能量化评价时存在一定的不适配性。首先，有人帆船VPP的水动力和空气动力模型多数来自于经验公式，在适用于无人帆船设计时会造成显著误差。其次，有人帆船的VPP多采用性能受初值影响较大的基于梯度的求解器，在应用于难以获得性能先验估计的无人帆船时也会造成较大的误差。为了解决上述问题，本章将提出一种基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)仿真和优化求解器的无人帆船航速性能量化评价方法。以便为无人帆船设计间的比较提供方法，为后续的航速性能优化工作提供基础。

本章第2节详细介绍了所提出的无人帆船航速性能评价方法。第3节以展示了以原理样机“海鸥号”的为例的航速性能量化评价流程与结果。第4节介绍了相关海试及海试结果与所得到的性能预测的对比。第5节对本章研究内容与结论进行了总结与归纳。

### 3.2 基于计算流体力学仿真和优化求解器的无人帆船航速性能评价方法

如图3-1所示，VPP是一种用以得到帆船航速性能评价的流程。它以感兴趣的外界环境(真风速、真风向)和特定设计为输入，利用水动力和空气动力模型获得帆船在各个自由度上的受力，通过平衡求解器找到水动力与空气动力满足多自由度平衡的稳态(steady-state)，并将稳态所对应的航速、姿态和控制量作为该设计在外界输入情况下的性能和最优控制量。

为了在无人帆船缺乏适配的水动力与空气动力模型、且缺乏性能先验估计的情况下实现对无人帆船设计的航速性能量化评价，本文提出了一种基于CFD仿真和优化求解器的无人帆船航速性能评价方法(图3-2)。本文方法通过CFD仿真来对与传统帆船差异很大的船体、龙骨和帆进行水动力和空气动力建模。为了平衡精度与计算代价，避免所需CFD仿真的“维度灾难”，舵和船体空气水动力与空气动力模型依然采用了相应的经验公式来得到。由于单体无人帆船推重比小，纵向惯性矩大，为了平衡求解的复杂度和精确性，本方法采用了四自由度(4-degree of freedom, 4-DOF)平衡方程，忽略了垂荡和俯仰平衡。本方法采用了遗传算法(Genetic Algorithm, GA)求解器。其优势在于基于优化的GA求解器不依赖于先验性能估计，具备良好的全局寻优性能。为了有效的降低计算代价同时提高

求解精度，本文对标准 GA 求解器进行了改进。此外本文提出了一种创新的基于邻域信息的优化策略(Neighbourhood information-based optimisation, NIBO)，以利用相关状态(同真风速或同真风向)之间的自然联系加速收敛以及进一步提高航速性能定量评价精度。

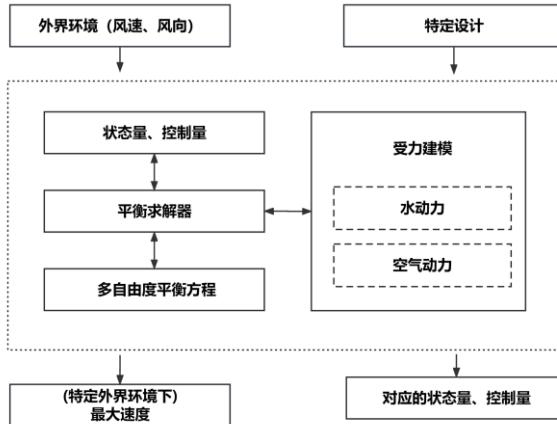


图 3-1 速度预测程序的组成

Figure 3-1 Components of the velocity prediction programme

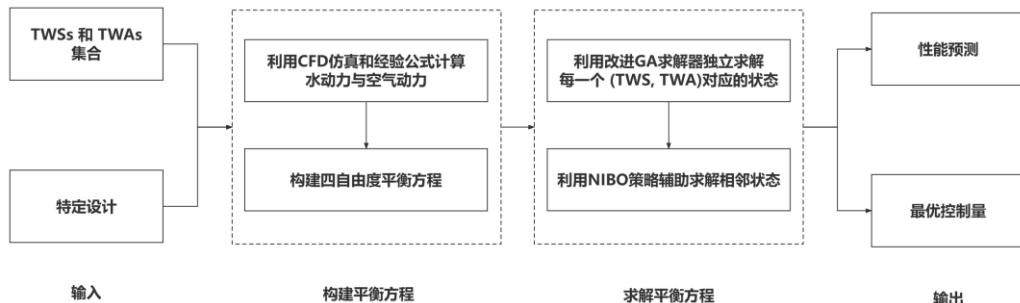


图 3-2 本文方法的示意图

Figure 3-2 The schematic of the proposed method

### 3.2.1 基于计算流体力学仿真的平衡方程构建

如图 3-3 所示，定义在特定外界条件(真风速  $v_t$  和真风角  $\beta_t$ )下的航态，包括航速  $v_s$ ，姿态(横倾角  $\theta$  和偏航角  $\lambda$ )和控制量(帆转角  $\beta_s$  和舵转角  $\beta_r$ )。定义两个原点位于重心 CG 的右手坐标系(图 3-4)：载体坐标系和惯性坐标系。其中载体坐标系的 x 方向为沿船体中纵线指向前方，以 lon, lat, 和 ver 标记。惯性系 x 轴沿速度方向，z 轴为重力方向，以 x, y, z 标记。因此，根据坐标系间的转换规则，风的方向，水流方向、船体、帆、舵坐标系之间的转换可由表 3-1 和公式(3.1)得到。

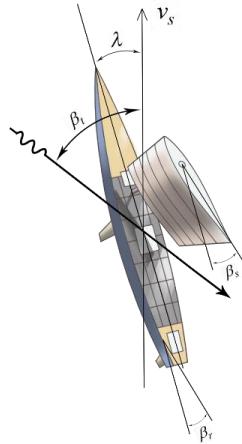


图 3-3 在特定外界条件下的航态的定义

Figure 3-3 Definition of a state under specific external conditions

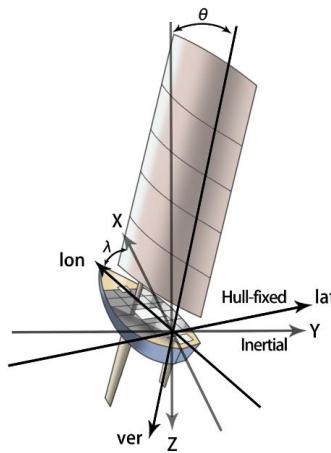


图 3-4 参考坐标系

Figure 3-4 Reference frames

表 3-1 子系统间坐标转换关系

Table 3-1 Transformation matrices between subsystems

从	至	转换矩阵 $C_{A2B}$
Flow direction	Inertial	$C_{v2i} = E_{yaw}(\pi)$
True wind direction	Inertial	$C_{tw2i} = E_{yaw}(\pi + \beta_t)$
Inertial	Hull-fixed	$C_{i2h} = E_{yaw}(\lambda) \cdot E_{roll}(\theta)$
Hull-fixed	Sail chord	$C_{h2s} = E_{yaw}(\beta_s)$
Hull-fixed	Rudder chord	$C_{h2r} = E_{yaw}(\beta_r)$

$$E_{yaw}(\lambda) = \begin{bmatrix} \cos\lambda & -\sin\lambda & 0 \\ \sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, E_{pitch}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix}, E_{roll}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

### (1) 水动力和空气动力建模

VPP 的性能量化评价准确性在很大程度上取决于空气和水动力学模型的准确性<sup>[140,141]</sup>。由于无人帆船的船体和龙骨与“标准”设计非常不同,我们采用 CFD 仿真对船体和龙骨进行建模。

船体和龙骨的水动力可以通过仿真建立的代理模型  $f(hull\ line, v_s, \theta, \lambda)$  得到:

$$[F_{x\_hk}, F_{y\_hk}] = f(hull\ line, v_s, \theta, \lambda) \quad (3.2)$$

因此, 船体坐标系上的力  $F_{lon\_hk}$  和  $F_{lat\_hk}$  可以通过转换矩阵  $C_{i2h}$  得到:

$$[F_{lon\_hk}, F_{lat\_hk}, 0] = [F_{x\_hk}, F_{y\_hk}, 0] \cdot C_{i2h} \quad (3.3)$$

无人帆船的舵通常与“标准”舵的形状相似。为了减少 CFD 的采样维度(当增加舵角作为一个变量时, CFD 的采样矩阵维度将从 3 增加到 4), 本文采用经验公式来获得舵的水动力。舵的升力和阻力都作用于舵的作用中心 CER。如公式 3.4, 由于龙骨的干扰, 方向舵的流入速度被认为是  $0.95 \cdot v_s$ <sup>[142]</sup>。忽略升沉运动, 公式(3.5)可以用来计算进流速度。此外, 舵的攻角需要通过下洗角来修正, 如公式(3.6)<sup>[142]</sup>。升力可由公式(3.7)计算得到, 其中升力系数斜率可由 Whicker 和 Fehlne<sup>[143]</sup>提出的公式确定。

$$v_r = 0.95 \cdot v_s \cdot C_{v2r}. \quad (3.4)$$

$$V_r = \| (v_{rx}, v_{ry}, 0) \| \quad (3.5)$$

$$\alpha_r = \tan^{-1}\left(\frac{v_{ry}}{v_{rx}}\right) - a_0 \cdot \sqrt{\frac{\frac{\partial C_{Lek}}{\partial \alpha_k} \cdot \alpha_k}{2 \cdot AR_{ek}}} \quad (3.6)$$

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot \frac{\partial C_{Ler}}{\partial \alpha_r} \cdot \alpha_r \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial C_{Ler}}{\partial \alpha_r} = \frac{5.7 \cdot AR_{er}}{1.8 + \cos \Lambda_i \sqrt{\frac{AR_{er}^2}{\cos^4 \Lambda_i} + 4}} \quad (3.8)$$

$$AR_{er} = 2 \cdot AR_r \quad (3.9)$$

龙骨相关的参数可以由公式(3.10-3.12)得到, 龙骨的有效展弦比是由扩展龙骨法得到的<sup>[144]</sup>。

$$v_k = v_s \cdot C_{v2h} \quad (3.10)$$

$$\alpha_k = \tan^{-1}\left(\frac{v_{ky}}{v_{kx}}\right) \quad (3.11)$$

$$AR_{ek} = \frac{2 \cdot (l_k + T_c)}{\left( \frac{c_{rex} + c_{tip}}{2} \right)} \quad (3.12)$$

舵产生的阻力包括诱导阻力和形状阻力。诱导阻力系数与有效升力系数的平方成正比<sup>[145]</sup>。如公式 3.13, 形状阻力系数可以通过 ITTC 1957 年的公式和形状系数得到。

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot \left( \frac{\left( \frac{\partial C_{Le}}{\partial \alpha} \cdot \alpha \right)^2}{\pi \cdot AR_e} + 2 \cdot \frac{0.075}{(\log(Re) - 2)^2} \cdot \left( 1 + 2 \cdot \frac{t}{c} + 60 \cdot \left( \frac{t}{c} \right)^4 \right) \right) \quad (3.13)$$

舵上的水动力在惯性系上的投影  $F_{x\_r}$  和  $F_{y\_r}$ , 以及在载体系上的投影  $F_{lon\_r}$  和  $F_{lat\_r}$ , 可由公式(3.14)和(3.15)得到:

$$[F_{x\_r}, F_{y\_r}, 0] = [-D, -L \cdot sign(\alpha), 0] \cdot E_{yaw}(-\alpha) \cdot C_{r2i} \quad (3.14)$$

$$[F_{lon\_r}, F_{lat\_r}, 0] = [-D, -L \cdot sign(\alpha), 0] \cdot E_{yaw}(-\alpha) \cdot C_{r2h} \quad (3.15)$$

无论是软帆还是翼帆, 其受力模型都可以由阻力系数  $f_D(profile, \alpha, Re, AR)$  和升力系数  $f_L(profile, \alpha, Re, AR)$  的形式表示。唯一的区别是, 翼帆的控制量是转角, 而对于软帆来说是 flat, reef, 和 twist。软帆的空气动力学模型可以从经验模型中得到, 如 Jackson 模型或 Fossati 模型<sup>[79,146-148]</sup>。因为翼帆的小展弦比的全攻角翼型数据的资料并不易获取, 本方法通过 CFD 仿真来建立空气动力学模型。空气动力作用翼帆在位于距前缘 25% 的弦长的帆受力中心(CE)上。力的分量如下: 真风矢量在帆上的投影  $v$  可以根据公式(3.16)计算, 忽略升沉运动, 进流速度  $V$  可以用公式(3.17)表示。攻角  $\alpha$  可以通过公式(3.18)计算。升力和阻力可以分别由公式(3.19)和(3.20)确定。

$$v = v_t \cdot C_{tw2s} + v_s \cdot C_{v2s} \quad (3.16)$$

$$V = \| (v_x, v_y, 0) \| \quad (3.17)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{v_y}{v_x} \right) \quad (3.18)$$

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot f_L(profile, \alpha, Re, AR) \quad (3.19)$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot f_D(profile, \alpha, Re, AR) \quad (3.20)$$

帆上的力在惯性参考系下的投影  $F_{x\_s}$  和  $F_{y\_s}$ , 以及在载体参考系下的投  $F_{lon\_s}$  和  $F_{lat\_s}$  可由下式得到

$$[F_{x\_s}, F_{y\_s}, 0] = [-D, -L \cdot sign(\alpha), 0] \cdot E_{yaw}(-\alpha) \cdot C_{s2i} \quad (3.21)$$

$$[F_{lon\_s}, F_{lat\_s}, 0] = [-D, -L \cdot sign(\alpha), 0] \cdot E_{yaw}(-\alpha) \cdot C_{s2h} \quad (3.22)$$

因为桅杆被翼帆包裹着，所以只考虑作用在船体上的空气动力。船体可以被近似为一个具有小展弦比的翼型，并且经常工作在失速条件下。因此，船体的升力可以忽略不计。采用 Fujiwara 发表的近似空气动力系数<sup>[149]</sup>。

$$F_{lon\_ha} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_T \cdot C_{lon\_ha} \quad (3.23)$$

$$F_{lat\_ha} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_L \cdot C_{lat\_ha} \quad (3.24)$$

$$M_{ha} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_{M\_ha} \cdot A_L^2 / L_{wl} \quad (3.25)$$

$$[F_x\_ha, F_x\_ha, 0] = [F_{lon\_ha}, F_{lat\_ha}, 0] \cdot C_{h2i} \quad (3.26)$$

## (2) 建立 4-DOF 平衡方程

帆船的平衡状态需要满足多个 DOF 平衡方程。每个 DOF 平衡为子系统的受力提供了一个交互界面，并能反映帆船系统中的耦合关系<sup>[150]</sup>。对于单体无人帆船，由于其推重比小，产生的水动力升力很小，为了在计算复杂度和精确性之间取得平衡，因此忽略俯仰和升沉平衡。公式(3.27-3.30)给出了四自由度平衡方程(图 3-5)。CE 和 CER 通常位于前缘弦长的 25% 处。侧向阻力中心由 Eliasson 等人提出的方法<sup>[151]</sup>确定，船体空气动力学的作用点被简化为 CG，稳定性臂  $GZ = f(mass, CG, hull\ line)$  可由静水力软件获得。

$$F_x = F_{x\_hk} + F_{x\_s} + F_{x\_r} + F_{x\_ha} = 0 \quad (3.27)$$

$$F_y = F_{y\_hk} + F_{y\_s} + F_{y\_r} + F_{y\_ha} = 0 \quad (3.28)$$

$$M_x = F_{lat\_hk} \cdot z_{CLR} + F_{lat\_s} \cdot z_{CE} + F_{lat\_r} \cdot z_{CER} + M_{ha} + \Delta \cdot GZ = 0 \quad (3.29)$$

$$M_z = F_{lat\_hk} \cdot \cos(\theta) \cdot x_{CLR} + F_{lat\_s} \cdot \cos(\theta) \cdot x_{CE} + F_{lat\_r} \cdot \cos(\theta) \cdot x_{CER} = 0 \quad (3.30)$$

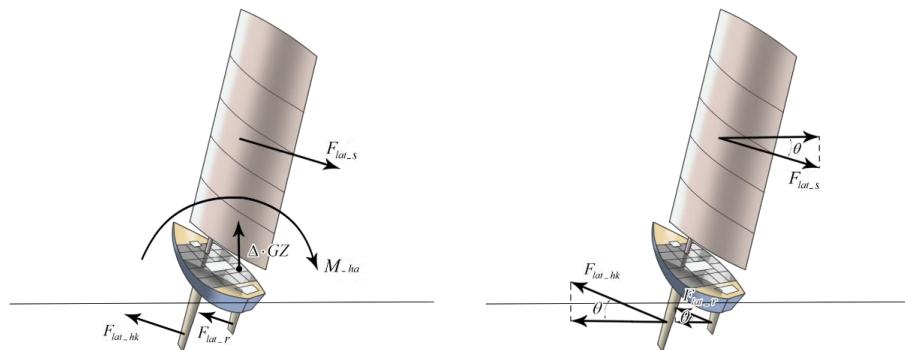


图 3-5 横滚和偏航自由度的平衡示意图  
Figure 3-5 Schematic diagrams of roll and yaw balance

### 3.2.2 采用改进遗传算法求解器的独立状态求解

求解器的任务是找到指定设计在特定外界条件下速度最大的一个稳态,认为此时的速度和姿态就是无人帆船在该外界条件下的性能参数,即:

$$(v_s, \lambda, \theta, \beta_s, \beta_r) = \underset{v_s, \lambda, \theta, \beta_s, \beta_r}{\operatorname{argmax}} v_s \quad \text{s. t.} \quad \begin{cases} F_x = 0 \\ F_y = 0 \\ M_x = 0 \\ M_z = 0 \end{cases} \quad (3.31)$$

对于这样一个高维非凸问题,基于梯度的平衡求解器在没有高质量的性能先验估计下,往往会落入局部极值。因此,我们采用了一个增强的 GA 求解器来解这个以公式(3.32)为适应度函数  $F(x)$  的优化问题。

$$\underset{x}{\operatorname{argmin}} F(x) = g(x) + f(x) \quad (3.32)$$

其中  $x = (v_s, \lambda, \theta, \beta_s, \beta_r)$ ,  $g(x) = -v_s$ ,  $f(x) = p \cdot \sum_{j=1}^m e_j^{k_j}(x)$ ,  $e_j$  是在水动力和空气动力在自由度  $j^{th}$  上的不平衡度,  $k_j$  为惩罚因子。敏感度因子  $p$  确保优化过程中  $F(x)$  对  $g(x)$  和  $f(x)$  的敏感性。在这个优化问题中,满足多 DOF 平衡方程 ( $f(x)=0$ )是一个很强的约束,在实践中,通常将约束放松到一个给定的公差范围内( $|f(x)| < \epsilon$ )。对于任何航速,都不能保证一定存在且只存在一个平衡状态。因此,在没有性能先验估计情况下,求解一个特定的状态时,收敛(找到一个足够好的解)是更为重要的。对于 VPP,一个有趣的事是,速度既是优化变量,也是优化目标的一部分<sup>[150]</sup>(公式 3.32);即得到  $f(x)$ ,就可以得到  $F(x)$ 。因此,我们提出了一个带有末位淘汰机制的改进 GA 求解器来提高其收敛速率(图 3-6)。在以  $F(x)$  为适应度函数进行优化时,我们周期性的将 20% 的最差个体,以  $f(x)$  作为适应度进行一轮额外优化。这意味着将这些个体替换为在当前速度下更“平衡”的个体,以增强局部收敛能力。一旦新获得的个体状态满足了由  $\epsilon$  定义的“平衡”,这意味着求解器在当前  $v_s$  下找到了一个“足够好的解”, $v_s$  就会被记录下来,并用于压缩以后子代的搜索空间。周期性触发频率为每进行 3-5 次全局优化(以  $F(x)$  为适应度的优化),进行一次局部优化(以  $f(x)$  作为适应度函数的优化),或者频率随着优化过程的进行而增加。过早和过度的增强收敛性会严重削弱全局搜索能力。

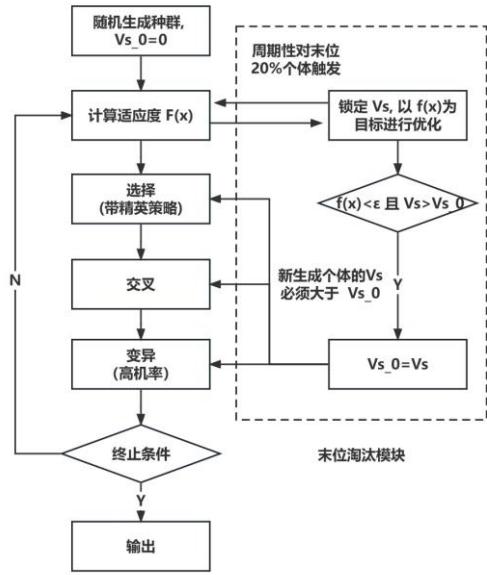


图 3-6 带有末位淘汰机制的改进 GA 求解器

Figure 3-6 Schematic of the end-place enhancement GA solver

### 3.2.3 采用基于邻域信息的优化策略的相关状态的联合求解

现有的 VPP 都是对不同的状态(一组特定的真风速 TWS, 真风角 TWA)进行独立求解。然而, 文献<sup>[150]</sup>指出, 对于高维非凸问题, 即使是基于优化的求解器也几乎不可能达到足够的全局搜索能力。如图 1-19 所示, 全局搜索能力不足会导致预测结果的波动, 而事实上, 相关状态之间应该有一个天然平滑的趋势。标准的后处理方法是在多次重复计算后取均值或通过拟合进行平滑。前者会大大增加计算成本, 而后者引入了数值污染。在本文所提出的方法中, 在求解独立状态时, 我们使用改进 GA 求解器来提高过程的收敛性, 但是, 需要指出的是, 提高收敛性的反面是对求解器的全局搜索能力的削弱。

针对上述问题, 本文提出了基于邻域信息的优化(NIBO)策略, 利用相关状态(同 TWS 或同 TWA 的状态)间的自然关联性来加速收敛并进一步增强性能量化评价的准确性。对于具有相同 TWA 的状态, 风力越强, 航速应该更快, 而且横倾和偏航应该更明显。对于具有相同 TWS 的状态, 连续的 TWA 下的性能应该是平滑的, 而不是波动的。因此, 已求解的状态可以作为相关状态求解的参考值(图 3-7): 对于具有相同 TWA 的状态, 个体在初始种群生成和突变模块过程中将更容易落入相关状态的信息限制的范围。基于此, 搜索方向可以被有效地引导, 以降低搜索的时间成本。对于具有相同 TWS 的状态, 则将执行滚动优化, 将新状态求解的搜索空间根据邻域信息进行压缩。只有当滚动优化的结果比原结果具有更优的适应度值时, 原始解才会被替换。当迭代适应度的变化足够小或达到预定的滚动优化次数时, 遂可以得到最终的结果。NIBO 策略充分利用了相关状态的自然关联性来加速求解, 避免数值污染的同时提高了 VPP 的全局搜索能力。

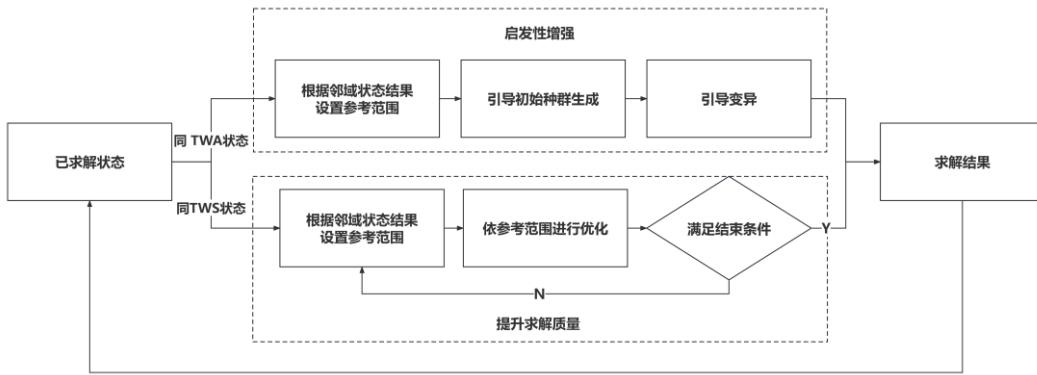


图 3-7 基于邻域信息的优化策略示意图

Figure 3-7 Schematic of the NIBO Strategy

### 3.3 “海鸥号”的航速性能评价

我们将所提出的无人帆船设计航速性能量化评价方法应用在自主研发的无人帆船原型机“海鸥号”上，通过对比预测和海试结果对本章所提出的方法进行验证。并将所得的性能评价作为进一步的优化设计的基础。

#### 3.3.1 “海鸥号”无人帆船原理样机

“海鸥号”样机(图 3-8)是我们设计的第一艘无人帆船，该船的设计具有一定的探索性，这一样机旨在对无人帆船总体配置、机械结构、能源、控制、导航等基本功能进行探索。为实现以上设计目标与试验目的，海鸥号采用了结构耐久性较好的翼帆和稳定性较好、具有大甲板的单体船体并配备了较重的龙骨以进一步提升其抗倾覆能力。



图 3-8 无人帆船样机“海鸥”

Figure 3-8 Autonomous sailboat prototype "Seagull"

“海鸥号”的整体设计既考虑到加工和运输的便捷性，又考虑到其强度与试验的适配性。该船的船体由玻璃纤维制成，总长为 3420 mm，排水量 155 kg，这个主尺度可以较容易的由 4 人进行短距离搬运，并装载于国标的 2.5 t 货车(其车厢尺寸为 4.2 m\*1.9 m\*1.8 m)。船体采用标准的远洋帆船型线，L/B 约 2.9， LDR 约 6.4，这种较肥大的单体船体可以提供大量的形状稳定性，并确保有较大的甲板面积以布置足够面积的太阳能板。船体的吃水较浅(型深 410 mm，吃水 105 mm，均不计龙骨)，拥有足够的干舷储备方便临时增加载荷，同时减少上浪对太阳能板的污染。

表 3-2 无人帆船原型机设计参数

Table 3-2 Design variables of prototype components

船体					龙骨				
$\Delta$	155	kgf	VCG	-265	mm	翼型		NACA 63015	
$L_{oa}$	3420	mm	$B_{oa}$	1175	mm	$c_{max}$	296	mm	$c_{min}$
$L_{wl}$	3250	mm	$B_{wl}$	965	mm	$\Lambda$	44	°	$l$
$D_c$	410	mm	$T_c$	105	mm				714 mm

帆					舵				
翼型		NACA 0012			翼型		NACA 0012		
$c_{max}$	745	mm	$c_{min}$	745	mm	$c_{max}$	140	mm	$c_{min}$
$\Lambda$	0	°	$l$	1600	mm	$\Lambda$	0	°	$l$

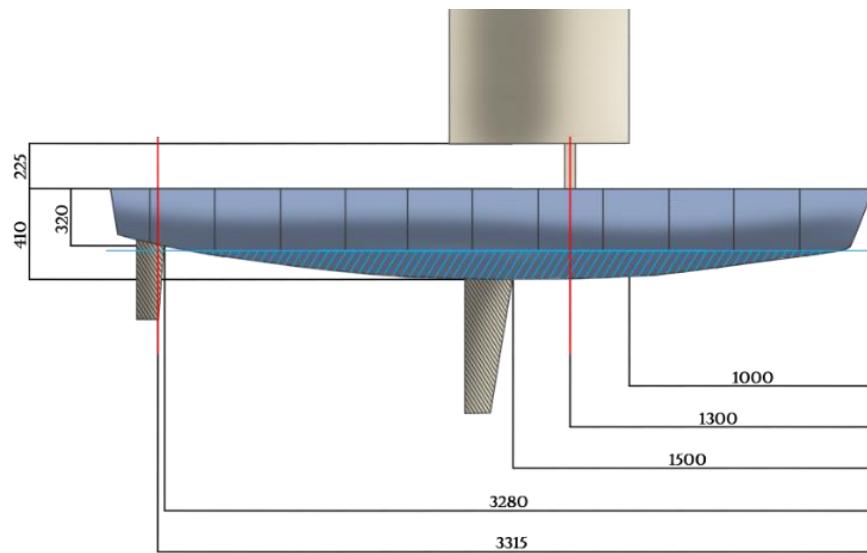


图 3-9 样机定位尺寸(mm)

Figure 3-9 Prototype location dimension (mm)

翼帆由玻璃纤维包裹轻木制成，由于材料重量的限制，帆面积较小，SAD 约为 4.1。考虑到便于加工，翼帆的纵切面被设计为矩形，横切面为弦长 745 mm，

展长 1600 mm, 的 NACA0012 翼型。展长相对较小是考虑到风力梯度的存在, 避免桅杆过高导致结构强度下降。为了便于加工, 海鸥号的龙骨采用了弦长 100 mm 过渡到 140mm 的铸铁材质梯形鳍龙骨。翼型为 NACA 63015, 这种翼型在小攻角下的效率极高, 可以提供较强的侧向力抵抗能力。我们之所以没有采用过深的龙骨是为了避免给平台的运输、安装布放造成不便, 此外由于船体的存在, 龙骨仅有一端产生耗散翼尖涡, 因此龙骨的等效展弦比为实际几何展弦比的大<sup>[152]</sup>。基于船体可以提供大量形状阻力, 该船龙骨采用轻量化设计, B/D 约为 20%。经过 WolfsonUnit 帆船稳定性规范<sup>[153]</sup>的初步校核, 平台可以承受 15 m/s 的风和 21.5 m/s 的阵风。具体的安装尺寸如图 3-9。

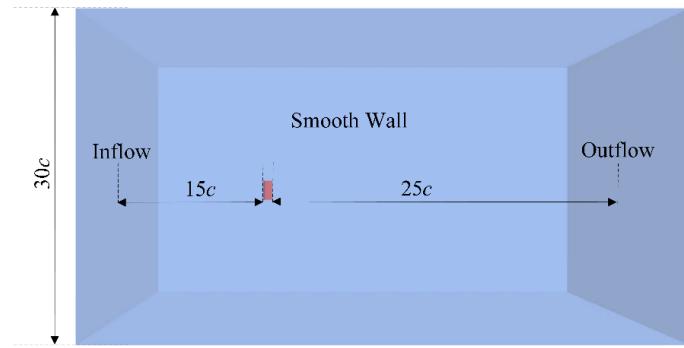
### 3.3.2 基于所提出方法的“海鸥号”航速性能评价

#### (1) CFD 仿真设置

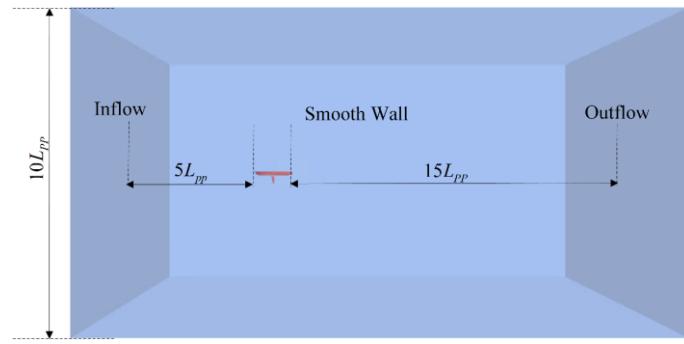
原理样机的静稳定性曲线  $GZ = f(mass, CG, hull\ line)$  是由静水力软件计算得到的。船体和龙骨的水动力模型是通过 CFD 仿真结果插值得到的。由于没有性能先验估计, 在帆的 CFD 仿真中, 攻角被限制在[0, 95]度之内。之所以将攻角限制在这个范围内, 而不是如其他文献中将攻角限制在失速前, 是因为翼帆可以在失速条件下提供驱动力。航速的范围是  $v_s \in [0, 3.39] \text{ m/s}$ , 对应于  $Fr \in [0.05, 0.65]$ 。横倾角被限制在  $\theta \in [0, 30]$  度, 以保持甲板不浸没水面。偏航角  $\lambda$  被限定在  $\lambda \in [0, 10]$  度, 以保持龙骨(NACA 63015 翼型)始终工作在不失速的状态下。我们忽略了舵角的影响, 以减少仿真采样矩阵的维度, 即  $\beta_r$  恒为零。

如图 3-10a 所示, 帆的计算域是块状的, 长、宽分别为帆弦长的 40 倍和 20 倍, 高度为弦长的 30 倍。网格如图 3-11a 图所示。在外部子域采用较粗糙的网格, 而对帆周围进行了网格加密。总网格数大约为 280 万个。前侧的边界被设置为速度入口, 后测边界被设置为压力出口, 四周的边界被设置为光滑壁面。在 5 m/s 的风速下, 计算帆攻角从 0 到 95 每 2 度的情况, 结果以升力系数(CL)和阻力系数(CD)的曲线形式表示, 如图 3-12 所示。

对于船体周围的流场, 计算域大小为  $10*10*20$  倍  $L_{pp}$  (图 3-10b)。为了准确捕捉自由表面, 自由表面上进行了网格加密。边界面的输入条件是进流速度。总计采用了 370 万个单元格(图 3-11b)。输入是船体和龙骨根据相应的姿态和吃水。输出是船体和龙骨在惯性坐标系中的受力。总共进行了 150 组 CFD 仿真, 对结果进行插值以获得响应面。图 3-13 显示了  $Fr=0.18$  时的响应面。



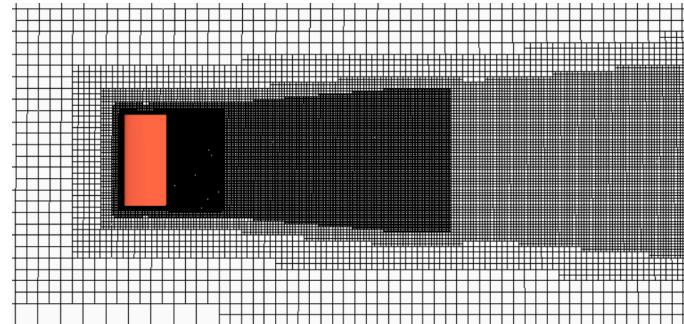
(a) 帆的计算域设置



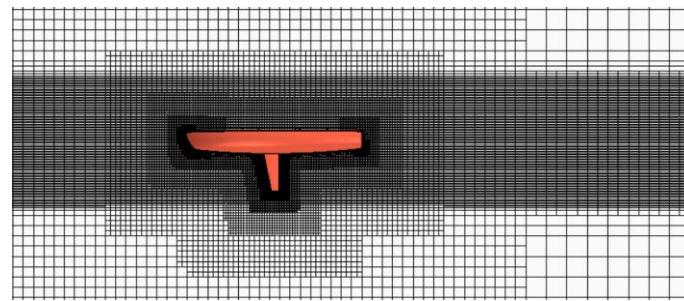
(b) 船体、龙骨的计算域设置

图 3- 10 计算域设置

Figure 3-10 Setup of the computational domain



(a) 帆的网格设置



(b) 船体、龙骨的网格设置

图 3- 11 网格设置

Figure 3-11 Mesh settings

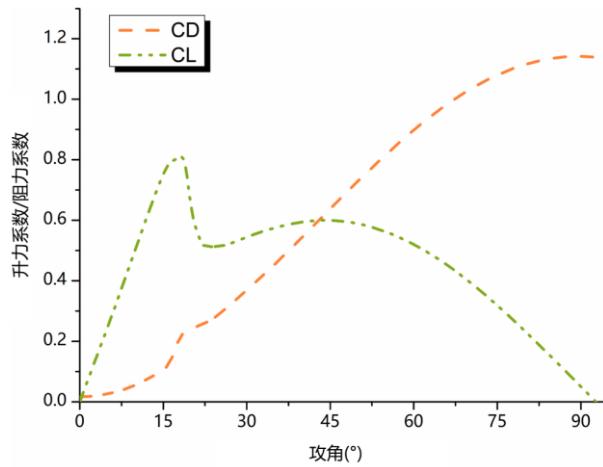
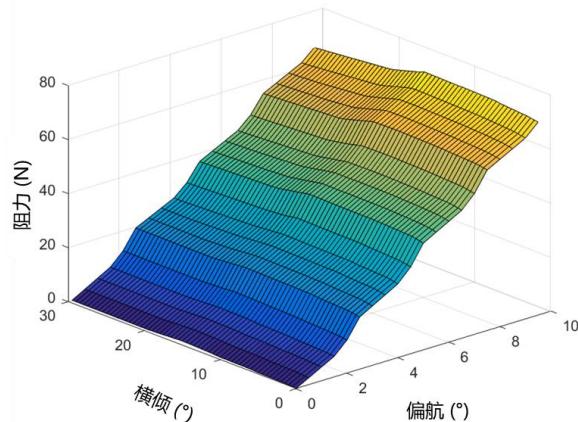
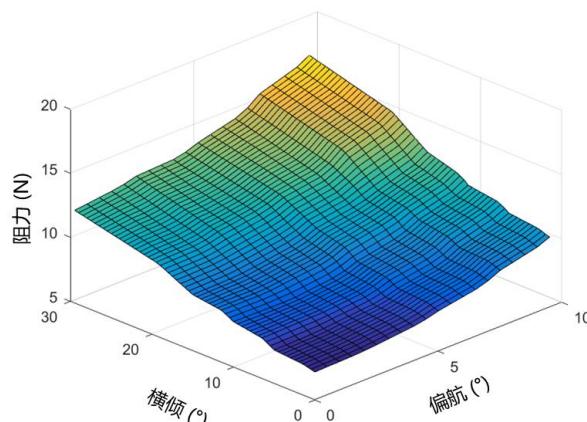


图 3-12 帆的 CL、CD 曲线  
Figure 3-12 CL and CD curves of the sail



(a)  $Fr=0.18$  时的水动力阻力



(b)  $Fr=0.18$  时的侧向力

图 3-13 在  $Fr=0.18$  时的水动力阻力与侧向力响应曲面  
Figure 3-13 Response surface for hydrodynamic forces along the X- and Y-directions at  $Fr=0.18$

### (2) 验证改进 GA 求解器性能

指定  $v_t = 12m/s$ ,  $\beta_t = 120^\circ$  作为测试外部环境条件, 以验证改进 GA 求解器在加速收敛方面的有效性。改进 GA 求解器和标准 GA 求解器同样被应用于平衡求解, 重复求解 10 次。改进 GA 求解器的种群规模为 50, 标准 GA 求解器为 60。这样设置种群规模的目的是保证标准求解器在每一代的计算次数不低于改进求解器的计算次数(改进求解器对 20% 的最差个体实施局部优化)。结果(图 3-14)显示, 改进 GA 求解器可以有效地加速收敛。

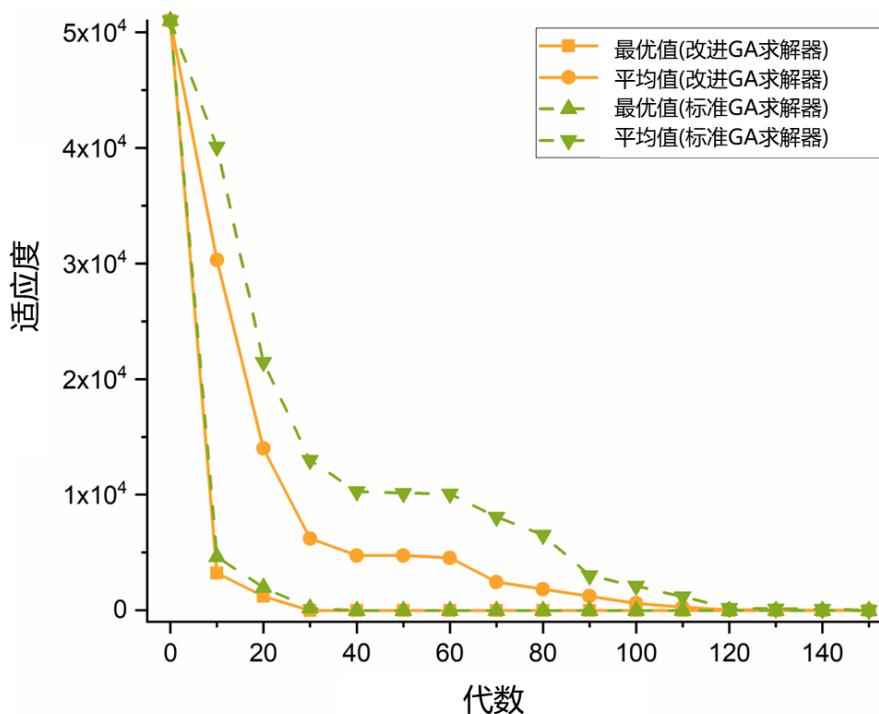


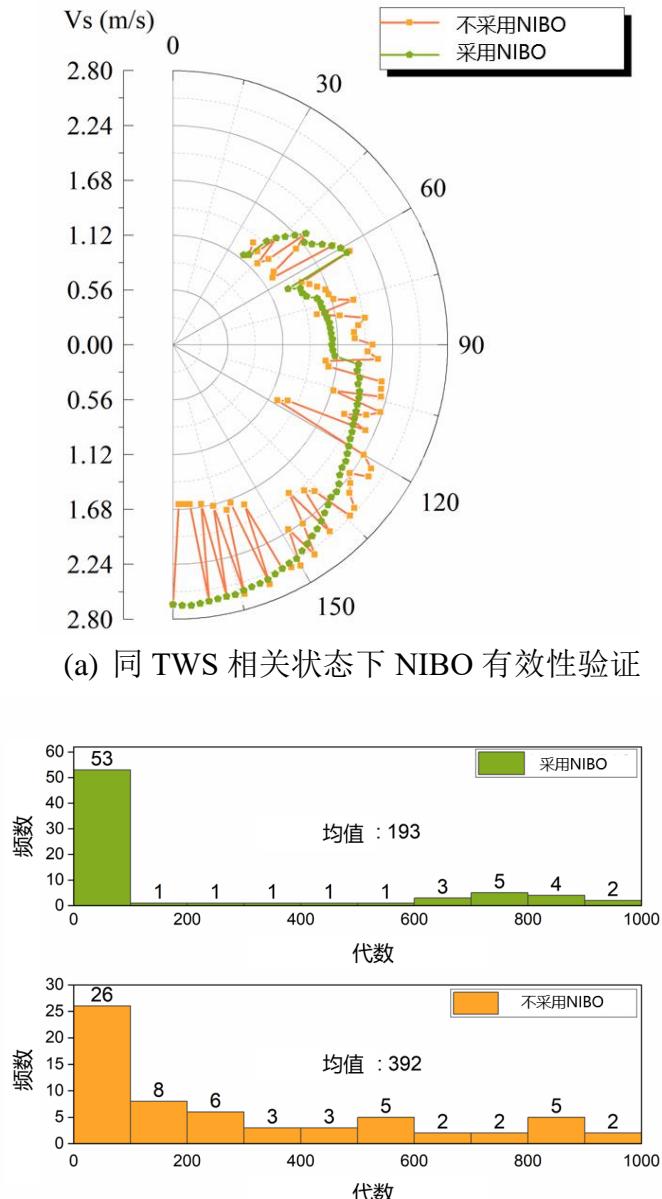
图 3-14 标准求解器与改进 GA 求解器收敛速度对比

Figure 3-14 Comparison of convergence rates between standard and enhanced GA solvers

### (3) 验证 NIBO 策略有效性

为了评估 NIBO 策略在同一 TWS 的相关状态下的有效性, 将  $v_t = 12m/s$ ,  $\beta_t \in [40^\circ, 180^\circ]$  的状态设定为测试外界条件。在测试 1 中, 标准的 GA 求解器用 120 的种群规模对每个状态进行独立的平衡求解。在测试 2 中, 首先独立求解各状态, 然后采用 NIBO 策略进行 2 轮滚动优化, 种群规模设定为 40。种群规模的设置保证了测试 1 的总计算次数不低于测试 2。两个测试得到的平均适应度为 -7.03 和 -7.77(最小化问题, 越小越好)。结果(图 3-15a)表明, NIBO 策略能以较低的计算成本显著提高求解器的全局搜索能力。对于同一 TWA 的相关状态, 分别在有和没有  $v_s = 12m/s$  的邻域信息加入的情况下对  $v_s = 8m/s$  的状态进行求解。种群的平均适应度收敛到预测结果的 95% 所需的代数(图 3-15b)表明, 仅采用一侧的邻域信

息，NIBO 策略就可以显著的加速收敛。



(b) 同 TWA 相关状态下 NIBO 有效性验证

图 3-15 NIBO 策略有效性验证

Figure 3-15 The effectiveness of the NIBO strategy

#### (4) 预测结果

预测结果，包括最大航速和对应的姿态如图 3-16a、b 和 c，最佳的帆转角如图 d。结果显示样机的设计有相当大的抗倾覆能力裕度，即使是在 16 m/s 下横倾角也未达许用极限。但在 16 m/s 风速下，仅靠龙骨无法保证偏航平衡。在所有  $v_t$  下，真风角  $\beta_t \in [0, 38]$  的范围内无法得到平衡解，这可以解释为这一区域就是原理样机的“死区”。在迎风条件下，可以观察到大约在  $\beta_t=65$  度左右，对应  $\alpha_s$  从 19

度到大约 35 度处有一阶跃(图 3-16a、b 和 d)。为了解释这个阶跃，我们将我们的结果与 Saoud 等人<sup>[154]</sup>的研究结果进行了比较。通过对翼帆的最优转角，及其升力和阻力系数特性曲线的对比可以发现，不寻常的阶跃来自于作为输入的帆升阻力曲线在失速角附近发生的阶跃(图 3-17)。

VPP 的预测结果表明，对于零  $\beta_r$  的情况，只有在  $\beta_t$  低于一个小值(本例中为 65 度)时，帆才会在非失速状态下运行，大部分  $\beta_t$  下帆都是在失速状态下运行的。当  $\beta_t$  大于 140 度时，帆几乎与风垂直，起到类似于球帆的作用。本文结果与其他文献的比较如图 3-18。其他研究者也报告了类似的策略<sup>[12,86,87,155]</sup>：在迎风条件下，采用小的  $\alpha_s$  以提供较大的升阻比，然后经历某种过渡，在正顺风时几乎完全垂直于风(在<sup>[155]</sup>中，作者表示 80 度是他们帆转角的上限值)。在 Tretow<sup>[89]</sup>的研究中，其将自平衡翼帆的最优转角在所有视风角下都设定为 12 度，因为 12 度时该翼帆可以提供最大升阻比。然而，这种策略对于直接控制转角的普通翼帆是不合理的，因为顺风航行时的帆上的阻力(对应于升力)可以为帆船提供驱动力。我们尝试了文献<sup>[87]</sup>提到的，在迎风条件下一直保持一个固定  $\alpha_s$  的策略，但是没能得到满足 4-DOF 平衡的解。综上，本文的结果是可信的和适用的。

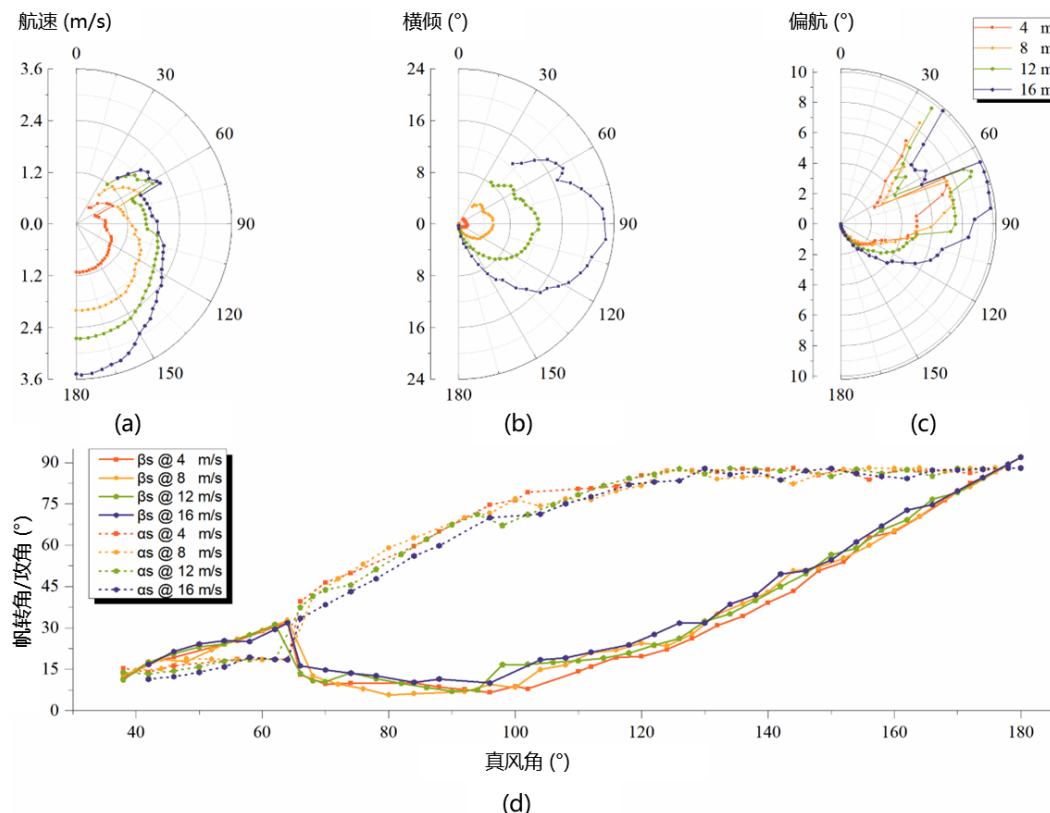


图 3- 16 VPP 预测结果  
Figure 3-16 VPP prediction results

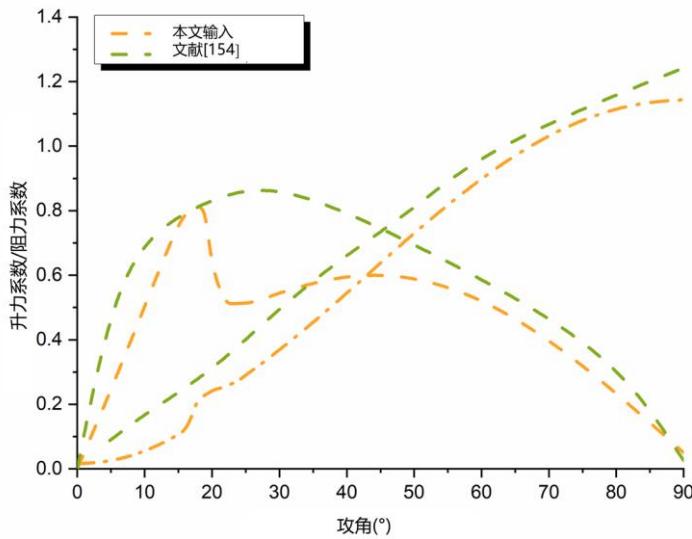
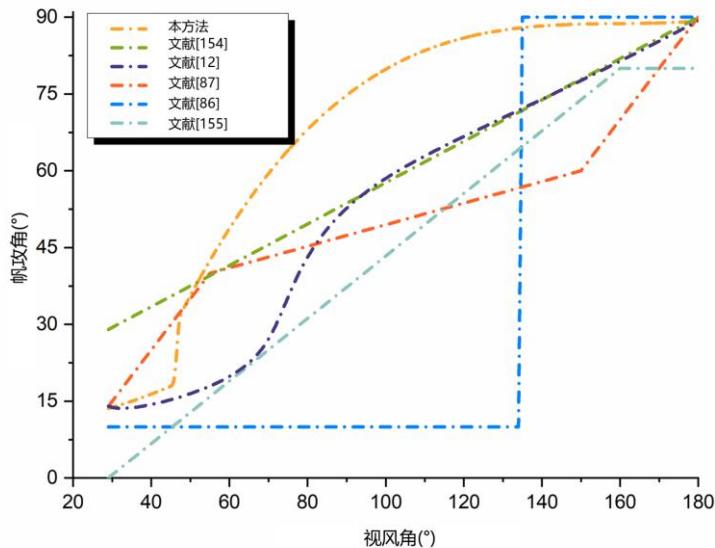
图 3-17 本文与 Saoud 等人研究<sup>[154]</sup>的输入对比Figure 3-17 Comparison of inputs in this paper with the study with Saoud et al<sup>[154]</sup>

图 3-18 与相关文献中帆最优控制量的对比

Figure 3-18 Comparison of optimal sail control strategies

### 3.4 对“海鸥号”航速性能评价结果的海试验证

海试于 2019 年 10 月在青岛北海船舶重工现场的 8 号码头进行(图 3-19)。根据船厂的安全规定，我们只被允许在微风中进行海试。海试采用了定向航行试验来验证 VPP 的有效性。在测试中，原型机沿预定直线轨迹航行。以下数据以大约 1 秒为间隔(带有时间戳)被记录下来。轨迹、视风速和视风角是由安装在船艏的气象站得到的。气象站的 GPS 位置精度为 $\pm 3$  米，风速的误差为 5%，分辨率为 0.1 米/秒。风向的精确度为 $\pm 3^\circ$ ，分辨率为 0.1 度。帆的转向角被设定为(惯性坐

标系下的)视风角的一个预置函数。舵角由航向控制算法控制。两个转角的测量都是基于旋转电位器的。原型机实际帆角和记录值之间的总误差为 $\pm 3.0^\circ$ 。我们无法提供关于水体流速的数据，但水面较为平静。根据船厂的安全规则，试验期间必须有一艘辅助船跟随。为保证海试数据精准，避免辅助船对于样机的影响，我们尽力确保了辅助船的位置离原型机足够远。相关数据显示在图 3-20 中。视风速(AWS)沿轨迹用颜色表示，视风角用矢量表示。

在这样一个半封闭的水域中，风况是经常变化的。对于每个时间点  $T_x$ ，我们检查  $T_{x-10}$  和  $T_{x+10}$ (大约 20 秒)之间的片段是否满足的视风速变化在 0.4 米/秒以内，视风角在 20 度以内。对于满足条件的片段，我们得到相应的平均速度、平均视风速和风角(惯性坐标系下)；此外，根据速度、真风和视风形的矢量三角形求解出平均真风速和角度。然后，我们对数据进行分组，分为真风速 1.6、2.0、2.4 和 2.8 米/秒 $\pm 0.2$  米/秒，真风角为 50、75、100、125 和 150 度 $\pm 5$  度。对每组的平均速度和标准差进行了统计。为了进行比较，将每组的代表值(1.6 米/秒 50 度，2.4 米/秒 150 度等)和相应的帆角(与输入帆控制器的预置函数相同)输入 VPP，得到航速性能定量评价结果。



图 3-19 “海鸥”号正在准备首航  
Figure 3-19 “Seagull” in preparation for her maiden voyage

海试记录数据和 VPP 预测数据的对比见图 3-21。我们认为，观测数据的标准差较大，是由于海试风速较小、风向频繁变化以及观测的系统误差造成的。然而，即使风速较大，对于这样一个半封闭的水域，随风而来的波浪和海流会通过复杂的反射作用于原型机，也很难保证收集和获得更好的结果。由结果可以看出，随着风力的增大，VPP 高估速度的趋势也在增加，这是大概率是因为气象站低于帆的空气动力中心而存在风力梯度(风速随高度增加)。其他可能的误差来源包括：VPP 没有考虑波浪附加阻力模型和子系统的空气动力学和流体力学模型的不准确性。尽管如此，最为重要的是，预测结果与海试数据的总体趋势证实了所提出

的VPP的有效性，如果将预测得到的速度视作设计的一种“得分”，其可以定量地评估单体无人帆船设计。



图 3-20 定向航行数据  
Figure 3-20 Data recorded during directional navigation

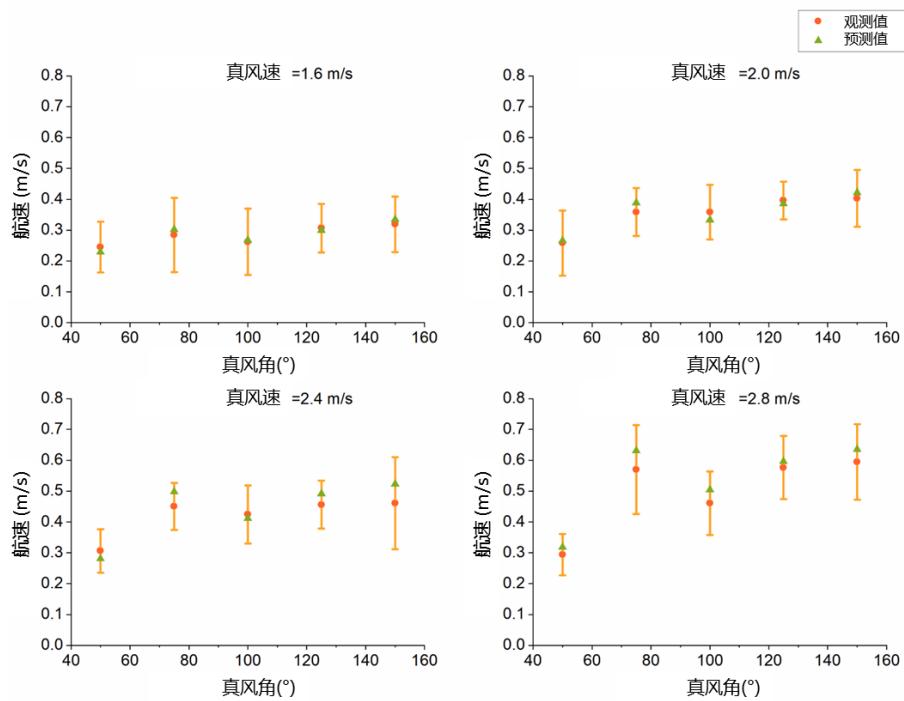


图 3-21 预测数据与实航数据对比  
Figure 3-21 Comparison of recorded data and predictions

### 3.5 本章小结

本章针现有评价机制与无人帆船不适配产生的评价失准的问题，提出了一种基于计算流体力学仿真和优化求解器的无人帆船设计航速性能评价方法。基于 CFD 仿真而不是经验公式来得到无人帆船的水动力与空气动力模型，使得该方法能够对任意无人帆船设计进行定量评价。优化求解器的使用使得该方法可以在缺乏先验性能估计的条件下得到较精确的航速性能量化评价。

此外，本章创新的对标准 GA 求解器进行了改进，通过增加末位淘汰模块有效的提高了求解器在缺乏性能先验条件下的求解收敛速度。同时，本章还提出了一个基于邻域信息的优化策略，其可以利用相关状态间的自然关联性显著的提升性能量化评价精度并限制减少所需的计算量。对“海鸥号”的性能预测和相关海试结果表明，本章提出的方法可以有效的对无人帆船设计的性能进行量化评价，为无人帆船设计间的横向比较提供了方法，为后续的设计优化工作打下了基础。

## 第4章 面向航速最优的无人帆船设计方法研究

### 4.1 引言

如 1.4.2 节相关现状和第二章的深入分析所述, 目前无人帆船设计中, 航速性能与抗倾覆能力呈现尖锐对立。现有的无人帆船平台在二者的权衡中显著的偏重于抗倾覆能力, 导致了航速性能的下降。而由于相关设计方法缺失, 目前无人帆船设计者难以在二者的对立关系中找到最优权衡。对于无人帆船这类一次性设计问题, 仿真驱动设计是一种成本较低且有效的方法。然而无人帆船设计空间大、缺乏性能先验估计的特点将会导致 CFD 采样数的“维度灾难”, 即需要非常多的 CFD 仿真数来对设计的水动力与空气动力进行建模。为了解决上述问题, 在抗倾覆能力的约束下最大限度地提高无人帆船的航速性能, 本章提出了一种基于贝叶斯优化和知识迁移的无人帆船仿真驱动设计方法。

本章第 2 节介绍了本文所提出的无人帆船仿真驱动设计方法的原理与算法细节。第 3 节以“海鸥号”为例对仿真驱动方法进行了验证, 并得到了性能优化后的改进设计。第 4 节对本章研究内容与结论进行了总结与归纳。

### 4.2 基于贝叶斯优化和知识迁移的无人帆船仿真驱动设计方法

如图 1-23 所示, 在有人帆船设计中, 由于设计起点附近的较小设计空间和容易获取的先验性能估计, 只需要进行较少的离线采样, 就能对设计的空气和水动力模型进行建模。然而, 对于无人帆船而言, 设计空间更大且缺乏先验性能估计, 因此在建立单个设计的水动力与空气动力模型时, 需要进行大量的 CFD 采样, 以覆盖高维空间。考虑到每组 CFD 采样需要数个至数十小时, 而仿真驱动设计过程中需要迭代对数十至数百个设计进行评价, 这种计算代价是工程上不可接受的。相关问题的数学描述如下。

#### 4.2.1 问题描述

问题描述如图 4-1 所示, 设计目标(公式 4.1)是在一个有界的设计空间  $S$  内找到在感兴趣的外界条件(如小风顺风和迎风大风两种状态)的集合  $C = \{c_i\}$  下拥有最佳性能的设计的帕累托集合。其中  $d$  是特定设计的设计变量集合,  $c_i$  是一组特定(在惯性系下)真风速和真风向的集合。

如前文所述, 为了确保平台在大风、迎风下不倾覆, 设计者们通常会牺牲平台的航速性能, 尤其是小风顺风下的航速性能。因此我们旨在最大横倾限制下同时优化这两种状态下的性能, 即在本文中  $i=2$ .

$$P(d) = \underset{d \in S}{\operatorname{argmax}} v_{s\_i} \quad (4.1)$$

如图 4-1 所示。对于每个  $d$ ，在  $c_i$  条件下的航速  $v_{s-i}$  可以由公式(4.2)中的设计评价器——VPP 得到。更具体的，如公式(4.3)和(4.4)，VPP 通过空气和水动力模型得到特定外界环境  $c_i$  下的特定设计  $d$  在特定航速  $v_s$ ，姿态 *attitude* 和控制量 *action* 下的力和力矩。

$$v_{s-i} = f_{VPP}(d, c_i) \quad (4.2)$$

$$F_{areo} = f_{areo}(d, c_i, v_s, attitude, action) \quad (4.3)$$

$$F_{hydro} = f_{hydro}(d, c_i, v_s, attitude, action) \quad (4.4)$$

随后，迭代找到能够使速度最大、且满足多自由度平衡方程的平衡状态，如公式(4.5),(4.6)所示。由于约束  $e=0$  过于严格，在实践中，通常将其放宽至小于一个很小值，即  $e < \epsilon$ 。目标函数可以被重写为公式(4.7)的形式，其中  $k$  是确保优化过程对  $v_s$  敏感性的超参数。

VPP 的预测性能极大地依赖于水动力和空气动力模型  $f_{areo}$  和  $f_{hydro}$  的准确性<sup>[111,140]</sup>。这些模型必须是可扩展的，同时应能够覆盖所有感兴趣的状态。为了工程上的可实现性，如何在没有准确的性能先验估计下以较少的计算代价获得较精确的空气动力和水动力代理模型  $f_{areo}$  和  $f_{hydro}$  是问题的关键。

$$v_{s-i} = \underset{v_s, attitude, action}{\operatorname{argmax}} \quad v_s \quad \text{s.t. } e = 0 \quad (4.5)$$

$$e = \sum_{DOF=1}^6 |F_{areo} + F_{hydro}| \quad (4.6)$$

$$\underset{v_s, attitude, action}{\operatorname{argmin}} \quad -v_s + k \cdot e \quad (4.7)$$

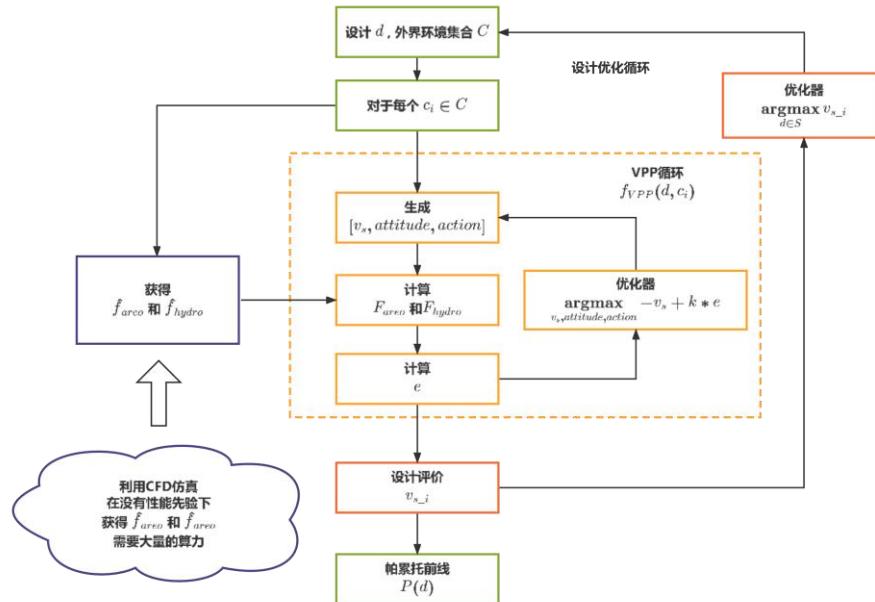


图 4-1 问题描述  
Figure 4-1 Problem Description

#### 4.2.2 采用贝叶斯优化与知识迁移的动机

##### (1) 利用贝叶斯优化自适应的构建代理模型

降低计算代价的一个重要途径是注意到无人帆船设计流程中的 VPP 部分只需要评估一个特定设计在少量相矛盾的外界条件下(在本文中两个：大风迎风和小风顺风)的性能，而不像是普通的 VPP 那样<sup>[156]</sup>需要评估平台在全部风力条件下的性能。因此对于每个设计，关于水动力和空气动力的精细全局模型是不必要的。如图 4-2 所示，采样被期望集中于未知的平衡点附近(即在  $c_i$  下满足多自由度平衡方程的状态)。

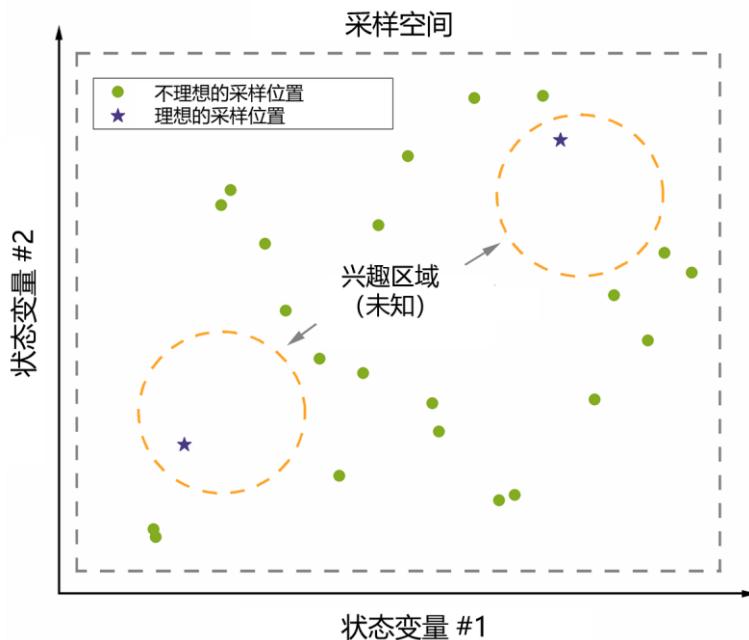


图 4-2 理想化采样的示意图

Figure 4-2 Schematic diagram of ideal sampling

贝叶斯优化 (Bayesian Optimization, BO)<sup>[157]</sup> 被广泛的应用在与本问题类似的，需要大量昂贵的非凸优化问题中<sup>[158-160]</sup>。与经典的空间填充采样策略(采用静态数据输入的离线代理)不同，贝叶斯优化在优化的过程中同步、动态的进行新数据的采样。具体而言，贝叶斯优化首先利用迄今为止收集的数据构建一个代理模型，定义一个采集函数(acquisition function)，其次，利用代理模型的不确定性指导进一步的搜索，即，采集函数的最大(最小)值点即为下一个采样点，最后在采样点执行仿真(或试验)，取得观测数据，更新代理模型，并继续迭代<sup>[161]</sup>。这个过程会一直持续到指定的允许仿真(或试验)数被耗尽<sup>[162,163,163]</sup>。因此，贝叶斯优化的引入可以用尽可能少的采样数完成优化过程<sup>[164-166]</sup>。

##### (2) 通过知识迁移复用优化过程中产生的高保真 CFD 数据

在帆船设计实践中，即使设计参数不同，空气和水动力特征在设计之间也具有一些共性。在文献<sup>[109]</sup>中，这种现象被称为“不同设计的力学特征曲线(曲面、

超曲面)共享相同的拓扑结构”即“当形状拓扑被保证”时“数据特征拓扑也被保证”(图 4-3)。理论上,可以利用这种设计间的潜在联系用更少的仿真数得到空气动力和水动力的代理模型  $\hat{f}_{aero}$  和  $\hat{f}_{hydro}$ 。

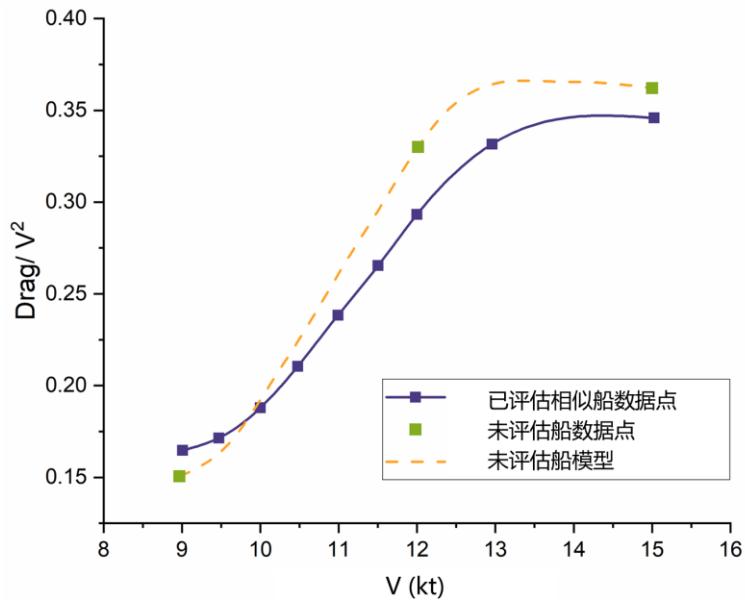


图 4-3 "不同设计参数但具有相同拓扑"示意图<sup>[109]</sup>

Figure 4-3 Schematic diagram of “Model with different design parameters but the same topology”<sup>[109]</sup>

因此,降低计算代价的另一个途径是引入知识迁移技术<sup>[167,168]</sup>来提取不同设计间的内在联系,最大化的复用优化过程中产生的高保真度 CFD 数据。知识迁移旨在将知识从源任务转移到目标任务,继而解决大多数传统机器学习算法面临的三个重大挑战:数据不足、计算能力不兼容和分布不匹配<sup>[169,170]</sup>。需要指出的是,实现知识迁移的主要挑战是源任务和目标任务之间是否存在本质的相似性。而在本问题的背景下,如前文所述,这种相似性是具有自明性和被自然保证的。虽然收集到的 CFD 数据不能直接被重用,但数据的某些部分仍然可以与新的设计中的一些有标记数据一起被重用。因此,本章工作的另一部分侧重将知识迁移纳入我们的设计方法,以提高 CFD 仿真数据的可重用性。

#### 4.2.3 方法细节

在所提出的方法中,外循环调用内循环以获得每个设计在感兴趣的外部环境下的速度性能,从而找到设计空间上的帕累托集。任何的多目标优化算法,如 MOEA/D<sup>[171]</sup>或 NSGA-II<sup>[172]</sup>都是可选的。在本文中,我们选择了被广泛应用的 NSGA-II 算法,它具有有竞争力的计算复杂度和较强的种群多样性<sup>[172]</sup>。算法流程图如图 4-4 所示。

在内循环中,每个设计下的速度评价都是通过双代理模型获得的。在算法的

初始阶段，首先基于拉丁超立方采样(Latin Hypercube Sampling, LHS)<sup>[173]</sup> 获得少量的 CFD 数据。然后基于这些数据构建一个粗糙的全局克里金模型，并结合设计优化过程中的得到的数据训练知识迁移代理模型(因此，最初的几个设计是在没有知识迁移代理模型的情况下进行评估的)。在更新阶段，我们首先在两个代理模型的基础上构建一个加权采集函数，以改善克里金代理模型由于在初始阶段采样不足而导致的预测性能不足。此后，根据贝叶斯优化过程中的采集函数进行迭代采样，直到允许的采样次数用完或达到预期的精度。在整个过程中，所有产生的数据都被记录下来，以便重复使用。

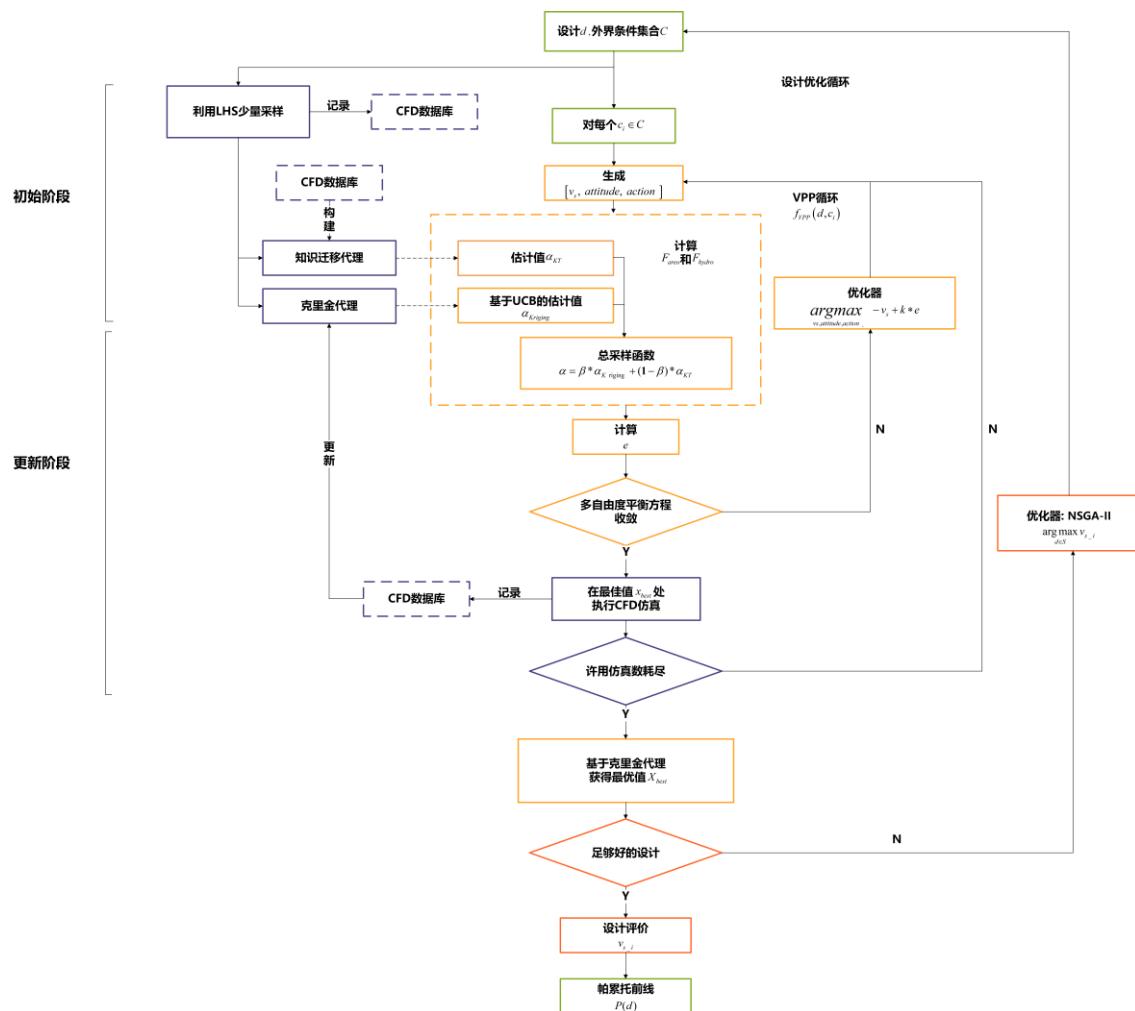


图 4-4 本文提出的仿真驱动方法的流程图

Figure 4-4 The flowchart of the proposed method

### (1) 初始阶段

初始阶段的具体算法详见 Algorithm 1，由于在无人帆船设计中对任意设计  $d$  都无法得到较好的性能先验估计，所以有必要对设计的状态空间(内循环的搜索空间)内的一些预定数量的点进行采样以获得其水动力和空气动力的全局特征。因此，使用 LHS 进行对每个感兴趣的  $c_i$  对应搜索空间进行独立采样，独立采样

能够确保采样的更多的集中在所关心的区域附近。随后，这些样本首先被用来构建一个粗糙的全局克里金代理模型，与其他代理模型不同的是，克里金代理它不仅能给出非样本点的估计值，还能同时给出该点的预测误差。粗糙的克里金代理模型将被用来在 BO 期间指导代理模型更新。

然而，较少的采样数不能充分的捕捉到水动力和空气动力的精确全局特征。故而，从 LHS 获得的样本与 CFD 仿真库(这个库是在整个设计优化过程中构建和不断填充的)中的已有观测数据被一起用于训练知识迁移代理模型  $\hat{f}_{KT}$ ，为优化提供先验信息。具体而言，对于每一个已经评估过的设计，存储在库中的高保真观测数据  $d_i$  被用来构建一个关于该设计的水动力和空气动力特性的径向基函数 (radial basis function, RBF) 代理模型。当评估一个新的设计时，取出预定数量相似设计的 RBF 代理，冻结其网络参数后将这些 RBF 作为新网络的一部分，与新的 LHS 观测样本一起进行训练(网络输入为新的 LHS 的状态，输出为 LHS 采样中对应的水动力和空气动力的观测值，相近 RBF 的权值作为网络权重中的一部分，以训练另一部分权值)，以获得知识迁移代理。知识迁移代理的网络结构如下图 4-5 所示。

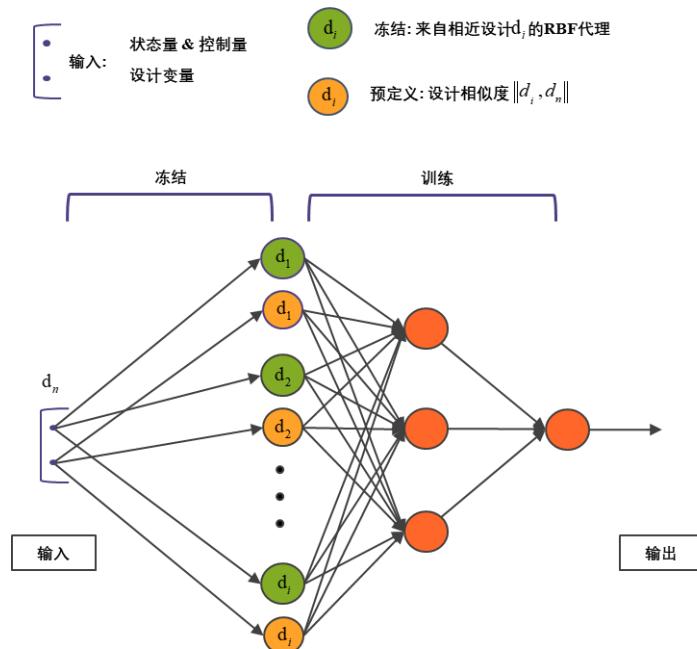


图 4-5 知识迁移代理的网络结构

Figure 4-5 Network structure of the knowledge transfer surrogate

**Algorithm 1** Pseudo code for initial stage

**Input** Design  $d$ , specific external condition  $c_i$  ( $i = 1, 2$ ), number of expensive CFD simulations allowed  $FE_{mi}$ . CFD simulation library  $Lib$ .

**Output**  $\hat{f}_{Kri}$  and  $\hat{f}_{KT}$ , new  $Lib$

1. Set searching space  $SP_i$  for  $X = [v_s, attitude, action]$  considering  $c_i$  ( $i = 1, 2$ )
2.  $j = 1$

```

//sampling under each external condition separately
3. for  $j \leq 2$  do
    //sampling to obtain rough global features
    4. Generation of  $\frac{FE_{ini}}{2}$  sampling points in the  $SP_j$  range using LHS.
    5. Perform CFD simulation on sampling points  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, \frac{FE_{ini}}{2}$ ), obtain
       observation  $Y_i$  including hydrodynamic and aerodynamic observations.
    6. Deposit  $[X_i, Y_i]$  into  $Lib$ .
7. end for
    //constructing crude kriging surrogate
8. Construct the Kriging surrogate  $\hat{f}_{Kri}$  by  $[X_i, Y_i]$  ( $i = 1, 2, \dots, FE_{ini}$ )
    //extracting prior information from characteristics of related designs
9. Load  $RBF_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) of the 5 most similar designs to  $d$  from  $Lib$ 
10. Train knowledge transfer surrogate  $\hat{f}_{KT}$  by  $[X_i, Y_i]$  ( $i = 1, 2, \dots, FE_{ini}$ ) and  $RBF_i$ 
     ( $i = 1, 2, \dots, 5$ )

```

## (2)更新阶段

更新阶段的伪代码显示在 Algorithm 2 中。在更新阶段，克里金代理通过贝叶斯优化进行迭代更新，直到预定的仿真次数耗尽。在贝叶斯优化中，探索(explore)和收敛(exploit)之间的平衡是通过采用采样函数来实现的。采样函数本质上是预测值和不确定性的加权和。它通常基于 Probability of Improvement(PI)<sup>[174]</sup>、Expected Improvement(EI)<sup>[175]</sup>、Lower/Upper Confidence Bound(LCB/UCB)<sup>[176]</sup>等策略构建。在本文中，考虑到最优值、预测值和不确定性，构建了如公式(4.8)的采样函数。 $\alpha$  为状态  $x$  在外界条件  $c_i$  下的响应。 $k_1, k_2, k_3$  是超参数， $v_{best}, v_{mean}, v_{uncertainty}$  取决于以下数值。

$$\alpha(X, c_i) = -v_s + k \cdot \sum_{DOF} k_1 \cdot v_{best} + k_2 \cdot v_{mean} + k_3 \cdot v_{uncertainty} \quad (4.8)$$

对于每个自由度 (DOF)，考虑到粗糙克里金模型提供的水动力和空气动力力(力矩)可能存在较大的不确定性，其合力  $|F_{areo} + F_{hydro}|$  可能存在更大的不确定性，在进程的早期会导致优化缺乏启发性。因此在采样函数中加入了知识迁移代理的预测值来提高其启发性。 $F_{areo}$  和  $F_{hydro}$  可以通过克里金代理和知识迁移代理得到，权值  $\beta$  依赖于当前采样数  $N_{now}$  和最大采样数  $N_{max}$ ，如公式(4.9)。这样的设置保证了在优化的初期，历史观测信息中的先验信息可以被从相近设计的观测值中有效的提取出来。而在克里金代理的不断更新而越来越准确的中后期，这些先验知识不会对优化进程造成干扰。 $F_{areo}$  和  $F_{hydro}$  可以由等式(4.10-4.13)中的均值  $m$ ，不确定性  $inv$ ，上、下界  $ub, lb$  表示。

$$\beta = \begin{cases} 2 \cdot N_{now} / N_{max} & \text{if } N_{now} < N_{max} / 2 \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (4.9)$$

$$m = \beta \cdot m_{Kri} + (1 - \beta) \cdot m_{TL} \quad (4.10)$$

$$inv = \beta \cdot inv_{kri} \quad (4.11)$$

$$lb = m - inv / 2 \quad (4.12)$$

$$ub = m + inv / 2 \quad (4.13)$$

因此  $|F_{areo} + F_{hydro}|$  的  $v_{best}, v_{mean}, v_{uncertainty}$  如等式(4.14-4.20)所示。其中  $v_{best}$  表示水动力(或力矩)的最小差值的百分比,  $v_{mean}$  代表水动力(或力矩)最佳值与平均值的偏差的百分比。这两者都表征收敛程度。 $v_{uncertainty}$  与最佳值和平均值之间的偏差占不确定区间的百分比呈负相关, 意味着探索能力, 即寻求全局最优的性能。

$$m_{sum} = m_{areo} + m_{hydro} \quad (4.14)$$

$$ub_{sum} = ub_{areo} + ub_{hydro} \quad (4.15)$$

$$lb_{sum} = lb_{areo} + lb_{hydro} \quad (4.16)$$

$$inv_{sum} = ub_{sum} - lb_{sum} \quad (4.17)$$

$$v_{best} = \begin{cases} \min(|ub_{sum}|, |lb_{sum}|) & \text{if } sign(ub_{sum} \cdot lb_{sum}) = 1 \\ \min(|m_{areo}|, |m_{hydro}|) & \text{else} \\ 0 & \end{cases} \quad (4.18)$$

$$v_{mean} = \frac{|m_{sum}|}{\min(|m_{areo}|, |m_{hydro}|)} \quad (4.19)$$

$$v_{uncertainty} = \frac{1}{inv_{sum}} \quad (4.20)$$

更新阶段的终止条件是在所有外部环境  $c_i$ (在本研究中  $i=1,2$ )下都收敛。当满足终止条件时, 设计的所有观测值被保存, 并设计构建一个 RBF 代理, 以便在评估新的设计时可以调用它来构建一个知识迁移代理。

**Algorithm 2** Pseudo code for update stage

**Input** Design  $d$ , specific external condition  $c_i$  ( $i=1,2$ ), predefined search space  $SP_i$ , surrogates  $\hat{f}_{Kri}$  and  $\hat{f}_{KT}$ , optimisation history  $Lib$ , number of expensive CFD simulations allowed  $FE_{up}$ , predefined tolerance  $\delta$ , minimum sampling interval  $\Delta$ .

**Output**  $v_{s\_i}$  ( $i=1,2$ ), new  $Lib$

1.  $count_{sim} = 0$
2.  $flag_i = 0$  ( $i=1,2$ ) //termination identifier
3. **while**  $count_{sim} < FE_{up}$  **do**
  - //sampling under each external condition in turn
  - 4.  $i = mod(count_{sim}, 2) + 1$
  - 5. **if**  $flag_i = 1$

```

6.            $i = \text{mod}(i+1, 2) + 1$ 
7. end if
8. Set searching space  $SP_i$  for  $X = [v_s, attitude, action]$  considering  $c_i$  ( $i = 1, 2$ )
   //observing and saving observations according to the acquisition function
9. Obtain  $X_{best}$  that maximises  $\alpha(X, c_i)$ , as in Equations (8)–(16), using optimiser.
10. Perform a simulation on  $X_{best}$  and obtain the observation  $Y_{best}$ .
11. Calculate  $e$ , deposit  $[X_{best}, Y_{best}]$  into  $Lib$ 
   //determine if this external condition converges
12. if  $e < \delta$  or distance of nearest sample in Lib  $dis < \Delta$  do
13.     Obtain  $v_{s\_i} \in X_{best\_i}$ 
14.      $flag_i = 1$ 
15. end if
   //updating kriging surrogate
16. Update  $\hat{f}_{Kri}$  with  $[X_{best}, Y_{best}]$ 
17.  $count_{sim} = count_{sim} + 1$ 
   //determining if all external conditions converges
18. if all  $flag_i = 1$ 
19.     break
20. end if
21. end while
   //extracting and saving characteristics from observations of current design
22. Train RBF network with all samples of the current design deposited into  $Lib$ 

```

### 4.3 面向航速最优的“海鸥号”总体配置优化

第三章海上试验表明，在“海鸥号”原始设计中，抗倾覆能力没有得到充分的利用。因此，在本节中，我们以“海鸥号”为例，应用所提出的方法对“海鸥号”总体配置以原设计为起点进行优化设计，以进一步提高其航速性能。并对所提出的方法中贝叶斯优化部分和知识迁移部分进行验证。

#### 4.3.1 优化对象的选取及系统实现

在进行总体配置优化设计之时，我们面对一个前理性问题，即船体改变将导致舱内设备需要重新布置，而对龙骨的修改将导致需要重新设计船的支架和其他运输辅助设备，基于这一考虑，“海鸥号”总体配置优化工作只限于船帆，并未对其他部分结构进行改动。新的船帆将采用梯形配置替代之前的矩形配置。这种方案可以有效增加船帆面积，同时降低重心和风力梯度效应下的空气动力中心高度。

设计变量是帆的底边弦长(RC)，锥度比(TR)和展长 (SPAN)。如公式(4.21)和(4.22)所示，为了将设计变量限制在一个合理的范围内，避免船帆过大和过重，

变量的约束以两个衍生的无量纲数——帆面积/位移比(SA/D)和展弦比(AR)的形式给出。由于原设计的帆面积/位移比是 4，而实际航行表现显示帆的设计偏小，所以帆面积/位移比的范围被指定为[4, 8]。展弦比的范围被设置为[1, 7]，因为这是大多数无人帆船的翼帆的展弦比范围<sup>[177]</sup>。锥度比的范围是[0.4, 1]。帆主要是由轻木制成的，密度是  $120 \text{ kg/m}^3$ ，桅杆和帆驱动装置的重量都被计入船体重量。

$$AR = \frac{2 \cdot SPAN}{RC \cdot (1 + TR)} \quad (4.21)$$

$$SA / D = \frac{RC \cdot (1 + TR) \cdot SPAN}{2 \cdot V_{dis}^{\frac{2}{3}}} \quad (4.22)$$

从气象数据来看，目标海域的季节性风力特征是春季平均风速 5 米/秒，冬季 12 米/秒。因此，5 米/秒 150 度(顺风，在惯性坐标系下)和 12 米/秒 50 度(迎风)下的性能被定义为感兴趣的典型风力条件。

搜索空间设置如下，因为平台主要是在排水量模式下航行，傅汝德数 Fr 被设定为在[0, 0.46]范围内；横倾角被限制在[0, 26°]，保证即使使用在设计空间中最重的帆甲板也不会进水；偏航角被设定为[0, 10]。帆角被设置为上一章得出的最佳值  $\pm 20^\circ$  范围内<sup>[178]</sup>。

如图 4-6 所示，优化设计过程是完全自动的，软件之间的交互通过 Matlab 脚本进行，帆的参数化三维模型通过调用 CAESES 生成。CAESES 可以生成具有不同设计参数的高精度模型，并支持将生成的模型直接导入 CFD 软件中。网格划分和 CFD 仿真是用 StarCCM+ 进行的。

如图 4-7 所示，船体和龙骨的计算域是块状的，长、宽、高为  $20 \times 10 \times 10$  倍  $L_{pp}$ 。速度进口位于上游 5 倍  $L_{pp}$  处，压力出口位于下游 15 倍  $L_{pp}$  处。在船体上强制执行无滑移条件，而在周围区域应用远场自由滑移壁条件。流体体积(VOF)技术被用来仿真自由表面。自由面的初始位置是通过在仿真前插值流体静力学曲线中的设计重量(船体、龙骨、帆的总重)计算得到。网格总数约为 370 万。为了准确地捕捉流场特征，我们在自由液面和船尾波区域进行网格加密(图 4-9)。

翼帆被放置在与船体同一个惯性坐标系中相对静止。考虑到有两种不同的风况(顺风和迎风)，建立两个具有不同速度入口和压力出口的模型。如图 4-8 右所示，计算域长、宽、高为 RC 的 40 倍 30 倍和 30 倍。在外部子域采用较粗糙的网格，而在船帆周围的区域采用较精细的网格，总计 280 万个(图 4-9)。仿真的重点是风梯度的影响。进口风速由场函数定义如公式 4.23<sup>[101]</sup>。

$$v_w(h) = v_{l0} \cdot \left( \frac{h}{h_{l0}} \right)^\alpha \quad (4.23)$$

其中  $v_w(h)$  是在高度  $h$  的真风速， $v_{l0}$  是 10 米高处的真风速， $\alpha$  是 Hellmann

指数。

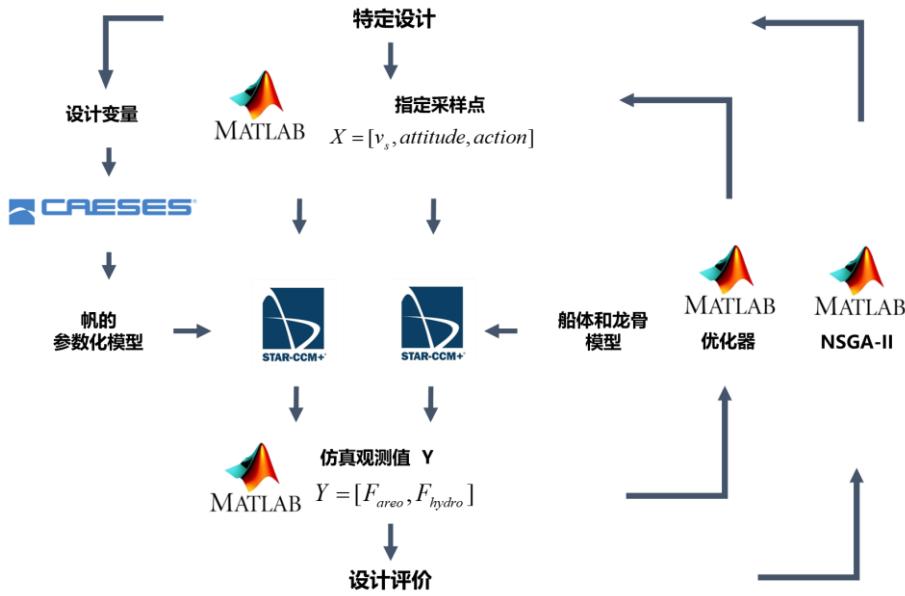


图 4-6 设计流程中的软件交互  
Figure 4-6 Software interaction for optimisation processes

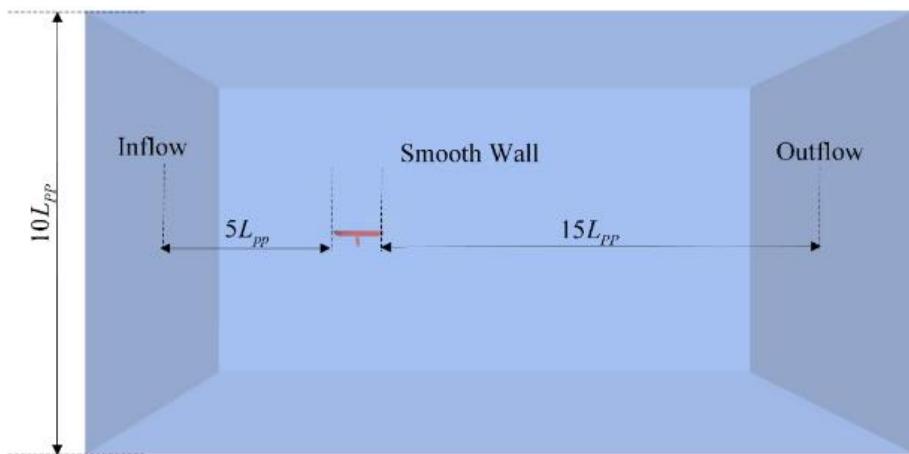


图 4-7 船体和龙骨的计算域设置  
Figure 4-7 Setup of the computational domain of hull and keel

设计优化流程考虑了 3 个自由度的平衡——纵荡、横荡和横摇。由于无人帆船通常在排水量模式下航行，水动力升力非常小，所以忽略垂荡。不计入纵摇运动是因为平台有很大的纵向惯性矩。忽略艏摇是因为模型中没有计入舵，而舵可以有效地保证艏摇平衡。考虑到在 Intel Xeon Platinum 8160 处理器(48 核)上，每个水动力和空气动力学仿真的组合需要大约 2 个小时，我们只在设计空间(外循环)内用规模为 10 的种群的三代进化来验证仿真驱动优化进程。优化设计过程中的参数设置如表 4-1。

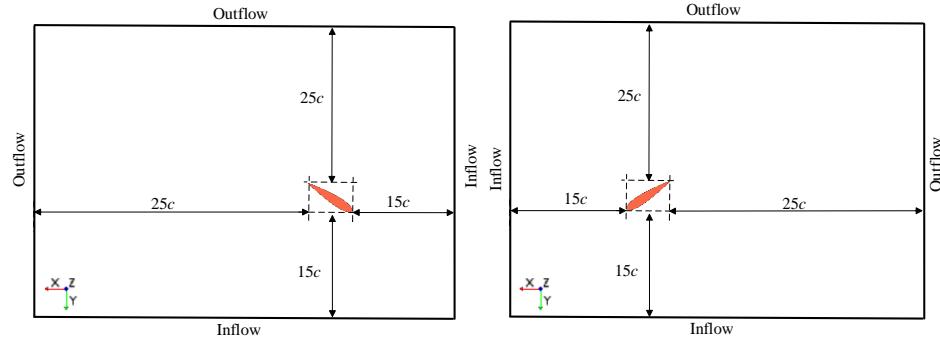
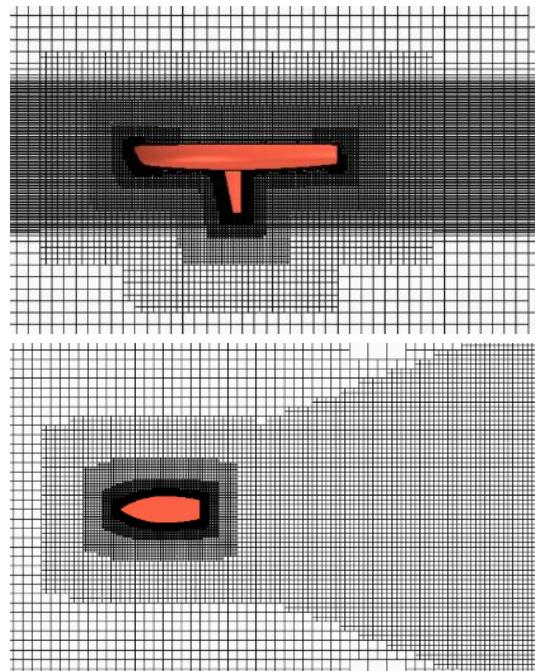
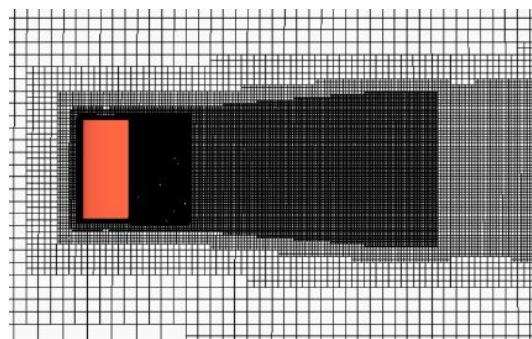


图 4-8 在顺风(左)和迎风(右)时的帆计算域设置

Figure 4-8 Setup of the computational domain of sail downwind (left) and upwind (right)



(a) 船体网格设置



(b) 帆网格设置

图 4-9 网格设置

Figure 4-9 Mesh settings

**表 4-1 优化设计过程中的参数设置**  
**Table 4-1 Parameters settings in the optimisation process**

变量	值	变量	值
$FE_{ini}$	20	$k_2$	5
$FE_{up}$	60	$k_3$	1
$k$	1	$\Delta$	0.02
$k_l$	10	$\delta$ (每个 DOF)	10%

### 4.3.2 方法验证与结果分析

为了验证 BO 方法的有效性，我们用前六个设计(不引入知识迁移)与离线代理方法进行对比实验。离线代理组的具体操作是，用 LHS 采样构建全局代理，其采样数与 BO 方法的许用采样数相同。然后基于这些采样构建全局离线代理并利用优化求解器求出平衡状态的解。最后是利用 CFD 仿真分别计算 OB 方法和离线代理方法解出的平衡点，计算出其不同自由度上的不平衡度:力或力矩的差值的百分比 eFX , eFY , eMX, eSUM, 并以此来衡量两种方法的平衡解质量。

结果如表 4-2 所示，在相同的样本数下，用离线方法很难获得可接受的“平衡状态”，而 BO 可以在没有先验性能估计下很好的收敛。同时，BO 获得的平衡状态的质量要好得多。因此，我们认为 BO 方法可以在相同的采样数下获得更好的性能估计，换言之，可以有效的降低所需的采样数、降低了计算成本。

**表 4-2 本文方法与离线方法平衡求解质量对比**  
**Table 4-2 Comparison of equilibrium states solved by offline methods and BO**

设计	风况	方法	$v_s$	$\theta$	$\lambda$	$\beta_s$	eFX	eFY	eMX	eSUM
RC	1.32	顺风	本方法	0.77	0.14	0.90	47.08	3%	6%	4%
SPAN	1.32	迎风	离线方法	0.78	0.24	0.66	45.00	10%	43%	36%
TR	0.4		本方法	1.15	0.87	1.43	31.40	4%	4%	2%
itr	70		离线方法	0.43	0.1	7.31	20.43	99%	24%	37%
RC	0.70		顺风	本方法	1.67	2.59	0.78	55.02	1%	3%
SPAN	4.92	迎风	离线方法	1.32	3.02	1.43	56.05	61%	27%	32%
TR	1		本方法	1.70	15.54	4.25	54.80	5%	9%	4%
itr	59		离线方法	1.47	16.59	4.63	32.36	23%	2%	11%
RC	0.77	顺风	本方法	0.81	0.25	0.83	47.43	0%	1%	9%
SPAN	1.65		离线方法	0.42	0.19	2.59	62.54	167%	33%	187%
TR	1		本方法	1.36	1.62	1.46	31.51	4%	8%	7%
itr	72		离线方法	0.75	0.95	4.16	24.11	15%	11%	19%
RC	1.12	迎风	本方法	0.91	0.14	0.49	62.24	0%	8%	4%
SPAN	1.30		离线方法	1.00	0.10	0.41	45.00	47%	87%	131%
TR	0.93		本方法	1.24	1.29	1.67	26.69	7%	3%	4%
itr	78		离线方法	1.19	0.74	1.69	27.96	11%	0%	74%

表 4-2 本文方法与离线方法平衡求解质量对比(续表)

**Table 4-2 Comparison of equilibrium states solved by offline methods and BO(continued)**

设计	风况	方法	$v_s$	$\theta$	$\lambda$	$\beta_s$	eFX	eFY	eMX	eSUM
SPAN 3.46	迎风	离线方法	0.73	1.72	3.11	61.28	107%	107%	200%	414%
TR 0.5		本方法	1.68	5.74	1.99	30.39	0%	4%	2%	6%
itr 65		离线方法	0.98	4.35	4.92	15.58	3%	59%	33%	95%
RC 0.54	顺风	本方法	1.16	0.49	0.47	62.97	0%	5%	2%	7%
SPAN 3.64	迎风	离线方法	0.94	4.42	0.52	62.65	108%	179%	122%	410%
TR 0.53		本方法	1.40	3.31	1.74	33.00	1%	1%	1%	3%
itr 66		离线方法	1.59	10.29	1.12	29.42	74%	35%	219%	328%

注: 顺风=5m/s @ 150°, 迎风=12m/s @ 50°

为了验证知识迁移代理的有效性, 给出了使用(前 6 个设计)和不使用知识迁移代理(后 24 个设计)的各自统计数据, 包括收敛所需的迭代次数和优化初始阶段前 10 次 BO 迭代的适应度函数值, 如图 4-10 示。结果表明, 知识迁移代理有效地启发了优化设计过程的初始阶段并加速了收敛。

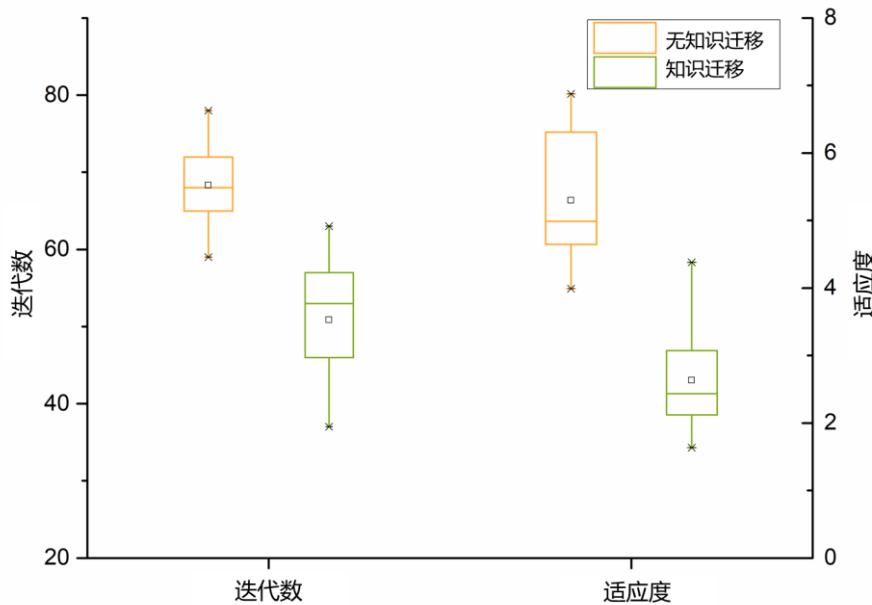


图 4-10 知识迁移代理效果验证

**Figure 4-10 Comparison of statistics with and without introducing knowledge transfer surrogate**

图 4-11 显示了所有 30 个设计的速度性能的帕累托前沿。图 4-12 显示了三个设计参数 Span、RC 和 TR 对迎风速度和顺风速度的影响。顺、迎风的性能表现出一致的趋势。总体来说, SPAN 对速度性能的影响是最明显的, 这与预期一致, 因为较高的帆可以通过风的梯度获得更多的动力。受最大帆面积的限制, 较大的 SPAN 通常对应着较小的 RC。理论上, 更大的 TR 可以更好地利用风, 但同时也提高了帆的重心和空气动力中心。优化结果显示, 性能更好的设计更多集

中在  $TR \in [0.6, 0.8]$  附近，但是影响有限。

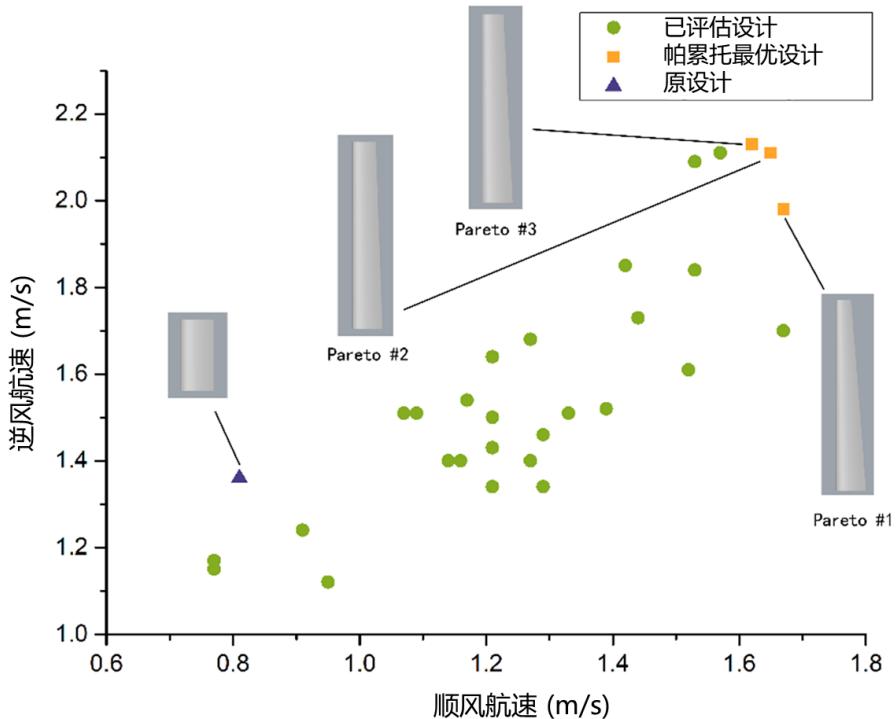


图 4-11 设计帕累托前沿  
Figure 4-11 Pareto front of designs

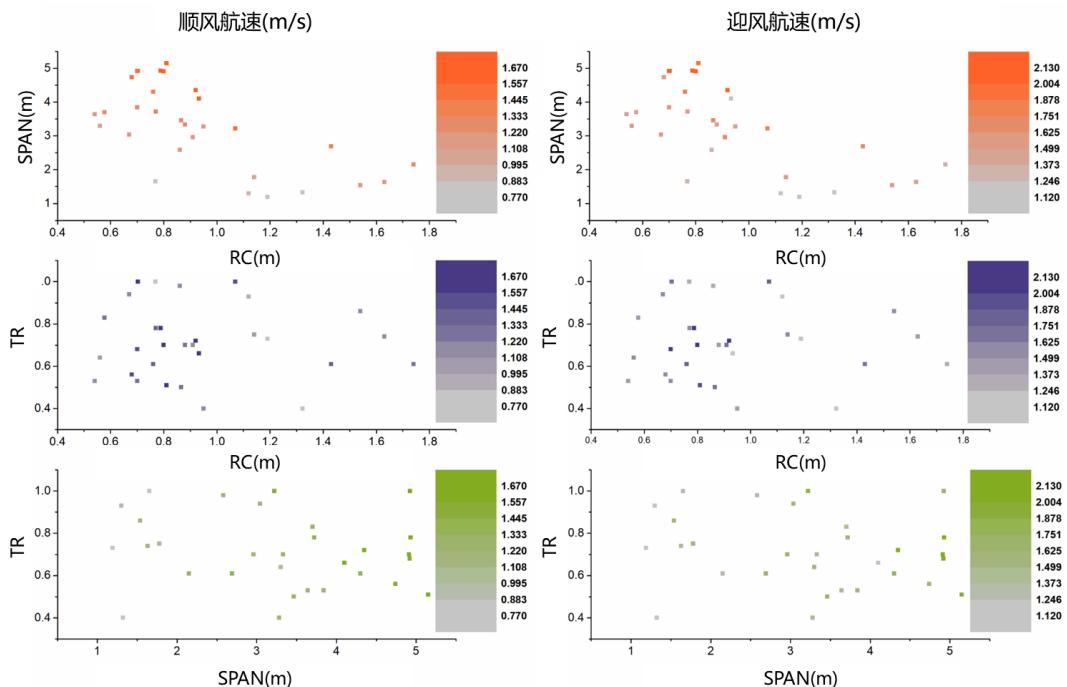


图 4-12 设计参数对优化目标的影响  
Figure 4-12 The influence of each two design variables on the optimisation objectives

表 4-3 比较了原始设计和帕累托最优设计的性能。结果显示，在设计参数约

束与横倾角约束下,本文提出的设计方法给出了能更加充分利用平台抗倾覆能力的帆设计,使平台的总体航速性能得到了提高。

**表 4-3 优化设计结果**  
**Table 4-3 Optimisation results**

设计	RC(m)	SPAN(m)	TR	风况	$v_s$ (m/s)	$\theta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	$\beta_s(^{\circ})$
原设计	0.77	0.77	1.00	顺风	0.81	0.25	0.83	47.43
				迎风	1.36	1.62	1.46	31.51
Pareto #1	0.81	5.15	0.51	顺风	1.67	1.70	0.52	63.81
				迎风	1.98	15.23	2.48	28.45
Pareto #2	0.79	4.93	0.78	顺风	1.65	3.09	0.95	48.02
				迎风	2.11	17.55	2.64	33.00
Pareto #3	0.80	4.91	0.7	顺风	1.62	2.73	0.89	50.09
				迎风	2.13	17.62	2.44	32.11

#### 4.4 本章小结

本章针对无人帆船设计工作中因缺乏系统的设计优化方法而导致难以在航速性能与抗倾覆能力的尖锐对立中获得最优权衡的现状,提出了一种基于贝叶斯优化和知识迁移的无人帆船仿真驱动设计方法。并将所提出的优化设计方法应用在“海鸥号”总体配置优化中,得到了航速性能更佳的总体配置。

本章通过引入贝叶斯优化,解决了因无人帆船设计中设计空间大、缺乏先验性能估计导致所需 CFD 采样数“维度灾难”的问题。通过引入知识迁移模块,实现了对设计优化过程中信息的高效复用,提高了设计优化过程的效率。仿真验证结果表明,所提出的方法能够高效的实现对无人帆船的设计优化,为在抗倾覆能力和航速性能的对立中找到二者更优权衡提供了可行的方法。

## 第 5 章 面向无人帆船航速提升的增稳水翼优化设计研究

### 5.1 引言

如第二章所述，无人帆船上无法实现换帆、压舷一类的操作，导致无人帆船抗倾覆能力不能随环境而改变是导致无人帆船的航速性能与抗倾覆能力之所以陷入尖锐对立，必须以一个相对固定的设计和性能面对多样的、瞬息万变的海洋环境的主要原因。为了解决上述问题，本章旨在对有望在无人帆船上应用的、可以改变无人帆船抗倾覆能力的环境自适应机构进行介绍、分析和选择和设计。并探索其设计参数对无人帆船总体性能的影响。

本章第 2 节介绍了被动水翼等环境自适应机构及其与无人帆船的适配性。第 3 节介绍了利用被动水翼增稳机构优化无人帆船航速性能所面临的核心设计问题。第 4 节面向无人帆船航速最优进行了增稳水翼方案设计。本章第 5 节对设计参数对增稳水翼的增稳、增阻性能、以及无人帆整体航速性能的影响方面的效能进行了探索和研究。第 6 节对本章研究内容与结论进行了总结与归纳。

### 5.2 被动水翼等环境自适应机构与无人帆船的适配性分析

目前，某些无人帆船采用了一些应对极端条件下抗倾覆能力不足的措施，如 Submaran 上装备的可折起的翼帆(图 2-7)和 Datamaran 的倾覆后自动扶正系统(图 2-6)。然而，这两种机构在运行时都使平台丧失了全部的推进力，所以只是一种“应急措施”。更理想的情况是无人帆船的抗倾覆能力能随外界环境的变化而动态地改变，进而使平台能够在驱动力损失最小的情况下适应各种风况。虽然无人帆船上没有此类技术的应用，但是在诸如有人帆船、商船、海洋工程等相关领域，已出现一些可资参考和启发的机构和技术。相关环境自适应机构的介绍如下，与无人帆船的适配性如表 5-1 所示。

#### (1) 广义面积可变帆

广义面积可变帆包括中式帆、仿生折叠帆、可伸缩帆以及充气帆<sup>[179]</sup>。它们都可以通过某种机制来根据外界条件的变化调整帆的面积，从而改变帆产生的驱动力和倾覆力矩的大小。

如图 5-1a，中式帆<sup>[180]</sup>(junk sail)是一种具有悠久历史的帆，在历史上被广泛的应用于中国和东南亚地区的帆船上。中式帆帆面可以如折扇一样被部分折叠，继而完成对帆面积的调整。中式帆靠帆是通过转角而不是索具的放松和收紧来进行效果调节，这种控制上的便利性使得中式帆非常适合于无人系统。此外独立桅杆的配置使得整个帆系统的更换和维护较为容易。在结构耐久性方面，中式帆的帆骨起到了支撑帆面的作用，并且将帆面分隔成了独立的单元，这使得中式帆在破损时并不像船体软帆那样几乎完全丧失空气动力学性能。同时，毋庸讳言的是，

中式帆虽然在顺风性能上较好，但由于帆骨的存在其迎风性能较普通软帆差。

仿生折叠帆是一种根据鸟类翅膀的空气动力学特征而设计出的船帆。鸟类起飞时会将翅膀张开呈扇形，翼尖较短而翼根较宽，以获得较大的升力系数；滑翔时，翅膀会变得更加锋利和狭长以降低阻力；需要进行快速机动时，翅膀的形态会变得更加宽而翼尖较窄，以提供更大的升力和操纵力。这与帆船在不同航态下的需求有相似性，受此启发 Dryden 提出了一种仿生可折叠帆<sup>[181]</sup>——The transition rig 的设想(图 5-1b)。该帆由铰接的结构支撑，可以在一根推杆的驱动下完成帆的展开、折叠或中间状态的维持。其优点是帆和桅杆可以完全收起。但是其较复杂的结构使得其可能在结构耐久性方面趋弱，在中间状态时其空气动力学外形也难以保证。

可伸缩帆<sup>[182,183]</sup>是一种特殊设计的帆系统，它主要应用在绿色船舶上(以主机驱动，采用帆辅助推进，以达到节能减排的效果。设计目的是让帆在需要时能够被迅速折叠收起，以便在紧急情况下或在进入如桥下等特定的区域时，快速降低帆的高度，以保证船只的安全。这种帆系统在软帆、翼帆中都有使用，软帆的可伸缩帆通常由可伸缩的轴和能够自动卷曲的帆布构成，当需要时可以将轴拉出，让帆布张开，形成一个完整的帆面。当需要折叠帆时，帆布会被自动卷曲回轴上，使得帆面尽可能的缩小，同时轴也可以被推回到桅杆中去。翼帆的伸缩帆如图 5-1c 所示，是一种类似天线的收缩机构，帆较高的部分会被收入较低的部分中。可伸缩帆较好的保持了翼型，因此相较于普通翼帆其空气动力学性能损失较小。但受其本身的结构设计和材料等因素的限制，其重量较重、结构耐久性方面也可能存在一些问题。



(a) 中式帆<sup>[184]</sup>

(b) 仿生可折叠帆<sup>[181]</sup>

(c) 可伸缩帆<sup>[183]</sup>

图 5-1 广义面积可变帆

Figure 5-1 Examples of reefable sails

充气翼帆(图 5-2)是由 IWS 公司设计的一种广义面积可变帆<sup>[179]</sup>。它在帆中设置相互独立的空腔，通过风扇将气体注入和放出空腔，以保持帆的膨胀或收缩的状态。它的优点是较其他可变面积帆体积更小且可以几乎完全收起。然而，高的气密性需求使得这种帆在应用于无人帆船时的结构耐久性方面存在隐患，同时，由于需要大量气体来维持帆的形状，又导致其需要较高的能耗。



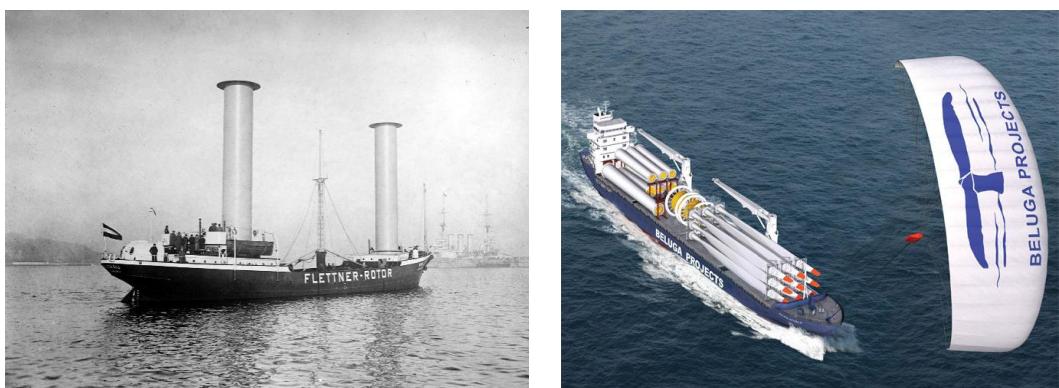
图 5-2 充气翼帆

Figure 5-2 Inflatable wing<sup>[179]</sup>

## (2) 变种帆

变种帆是靠风力产生推进力，但形式与传统帆不同的广义帆，包括玛格努斯帆(图 5-3a)和天帆(图 5-3b)。玛格努斯帆是由(电机等)动力驱动的旋转圆筒，当风吹过转动的圆筒时，其两侧产生压强差进而产生动力，这种现象被称作玛格努斯效应<sup>[185]</sup>。玛格努斯帆的优点在于其高效性和控制性能。相对于传统的帆船帆，玛格努斯帆能够在更低的风速下产生推进力，并且可以通过改变圆柱体旋转速度和方向来控制船只的航向和速度。此外，由于圆柱体可以沿着帆杆旋转，因此玛格努斯帆也具有更小的体积。实践证明，装备玛格努斯帆的船只在恶劣天气中表现出极佳的性能<sup>[186]</sup>。然而，玛格努斯帆也存在一些限制和挑战。例如，它的推进效率高度依赖于旋转圆柱体的直径和转速，因此存在重量和能耗方面的问题。

天帆是一种利用高空风力进行船舶推进的技术<sup>[187]</sup>。天帆系统由一个巨大的降落伞形状的帆，一个由船上控制的绳索控制系统和一个风力仪组成。在使用天帆时，风力仪会检测风速和方向，系统自动调整绳索系统的长度和方向，控制帆的形状、位置和角度，以最大化利用风力。由于天帆的线缆通常固定在甲板上，和传统帆相比，它产生的倾覆力矩几乎可以忽略不计。因此可以从根本上消除速度与抗倾覆能力之间的矛盾<sup>[188,189]</sup>。在应用于无人帆船时，天帆技术存在一些耐久性问题，而且天帆能适应的风向比传统帆要少，可能需要更频繁的换舷操作。

(a) Buckau 1924, 玛格努斯帆首次应用<sup>[190]</sup>(b) 天帆<sup>[187]</sup>

## 图 5-3 变种帆

Figure 5-3 Adjustable variant sails

## (3) 增稳机构

增稳机构包括可倾龙骨和被动水翼(图 5-4)，能为无人帆船提供额外的回复力矩。可倾龙骨<sup>[191]</sup> 是一种在船体下部悬挂的可调节龙骨系统。通常用于大型帆船或赛艇上，可以通过液压或电动机械系统来改变龙骨的位置，从而使船体的重心发生变化，以提高帆船的稳定性，从而在保证相同的回复力矩下降低所需的龙骨重量提高无人帆船航速性能<sup>[192]</sup>。然而，由于可倾龙骨重量较大、结构复杂，在无人帆船上应用时会面临一些结构耐久性、强度和能耗方面的挑战。

被动水翼是一种近年来在远洋运动帆船中被广泛采用的增稳机构。它通常的形式分为 Dali moustache(因形状类似西班牙画家 Salvador Dali 的胡子而得名)型水翼，Chistera 型水翼和 DSS (dynamic stability system)水翼<sup>[193]</sup>。当帆船横倾时，被动水翼会部分或全部浸没在水中，其升力可以抵消部分重力并提供额外的回复力矩<sup>[194,195]</sup>。水翼结构简单、不需控制，无能耗，且会随环境提供自适应的抗倾覆能力，非常适合无人帆船。



图 5-4 增稳机构(被动水翼和可倾龙骨)<sup>[196,197]</sup>

Figure 5-4 Stabilizers (passive hydrofoil and canting keel)<sup>[196,197]</sup>

表 5-1 环境自适应机构应用于无人帆船的优缺点

Table 5-1 Pros and Cons of the environment-adaptive mechanisms

种类	机构	优点	缺点	参考文献
广义面积可变帆	中式帆	受损后不完全丧失气动力性能 顺风性能良好 低能耗	桅杆无法收起 迎风性能差	[180]
	仿生折叠帆	轻质 低能耗	结构复杂	[181]
	伸缩帆	性能几乎无损失	结构复杂 重量重	[182,183]
	充气翼帆	轻质	高能耗 空气动力性能难以保持	[179]
变种帆	玛格努斯帆	力的大小可以精确控制 横风性能好	高能耗 除横风外性能较差	[186,198,199]
	天帆	几乎不产生倾覆力矩 高效利用风能	控制复杂 死区大	[101,187–189]

表 5-1 环境自适应机构应用于无人帆船的优缺点(续表)

Table 5-1 Pros and Cons of the environment-adaptive mechanisms(continued)

种类	机构	优点		缺点		参考文献
增 稳 机 构	可倾龙骨	◆	额外回复力矩可精确调整	◆	高能耗 ◆ 需要额外的中插板提供额外的侧向力平衡能力	[191,192,200]
	被动水翼	◆	无能耗 ◆ 重量轻	◆	容易碰撞 ◆ 设计难度大	[193-195]

在风大时、通常帆船的航速更快也更需要回复力矩。被动水翼产生的升力与速度平方成正比的特点，使得其在不需控制的前提下也能提供动态的额外回复力矩，且回复力矩的天然变化趋势与帆船的回复力矩的需求相适应的。因此被动水翼不仅结构简单、轻质、还是一种有效且无能耗的增稳机构，非常适合在无人帆船上应用。

### 5.3 利用被动水翼优化无人帆船航速性能的核心设计问题

由于无人帆船推重比较小，难以达到较高的傅汝德数  $Fr$ ，水翼与船体水动力升力对垂荡的影响较小，所以本文仅从纵荡和横摇两个自由度来考虑被动水翼对无人帆船整体性能的影响。即使是在已经简化的前提下，由于水翼的性能与帆船整体的性能强烈耦合，设计一个被动水翼来优化无人帆船的航速性能仍充满挑战。如图 5-5 所示，对于一个特定的无人帆船设计，其在一个给定的任意外界环境下平稳航行时，其船体和龙骨产生的阻力和回复力矩与帆上产生的动力和倾覆力矩相互平衡，将此状态下的航速定义为  $v_1$ 。在同样的外界条件下，当加入被动水翼后，水翼会产生额外的阻力(副作用)，同时会通过增加额外回复力矩的方式让平台可以在相同的横倾下支持更大的帆从而带来更多驱动力(正向作用)。此时无人帆船达到一个新的平衡，将该状态下的航速定义为  $v_2$ 。被动水翼的核心设计问题就是要保证水翼有总体的正向效果，即  $v_2$  在任意外界条件下恒大于  $v_1$ 。

考虑到帆船系统可以视作是一个“将回复力矩转化为动力”的装置，定义“抗倾覆效能臂”其等于在特定环境下构件(船体、龙骨、水翼)提供的回复力矩与带来阻力的比值。理论上来讲，保证被动水翼产生正向效果的条件是需要保证在所关心的外界环境下系统平衡时被动水翼提供的抗倾覆效能臂，即额外回复力矩/额外阻力，大于船体、龙骨本身所提供的抗倾覆效能臂。

上述条件的达成受三方面因素的影响：首先，水翼的抗倾覆效能臂受到水翼方案(安装位置、支柱形式)的影响。不同的安装位置会显著地影响水翼在不同状态下的浸没深度。当水翼深度较浅时，水流速度的减慢会导致水翼表面的动压力降低，从而使得水翼所产生的升力减小。还会导致水翼周围形成的涡流变得更加强烈和复杂，从而增加水翼受到的阻力<sup>[201]</sup>；而支柱的形式会影响通气效应(ventilation)<sup>[201]</sup>——处在半浸没状态的水翼或有支柱的水翼，在高速运动时，由

于水流受到水翼的阻挡和剪切，会在水翼表面形成一定的低压区域，使得水面上的空气被吸入到水翼下面，与水流混合形成气泡，从而降低水翼的升力和增加水翼的阻力。其次，不同水翼的设计参数，如水翼的几何尺寸、水翼的翼型等会显著地影响水翼的升力和阻力性能，继而显著地影响其产生的回复力矩。最后，在不同的状态下水翼和船体、龙骨的抗倾覆效能臂是不同的，而帆船系统在何种状态下取得平衡，即 $V_1$ 和 $V_2$ 的值取决于船体、帆、水翼的整体作用。

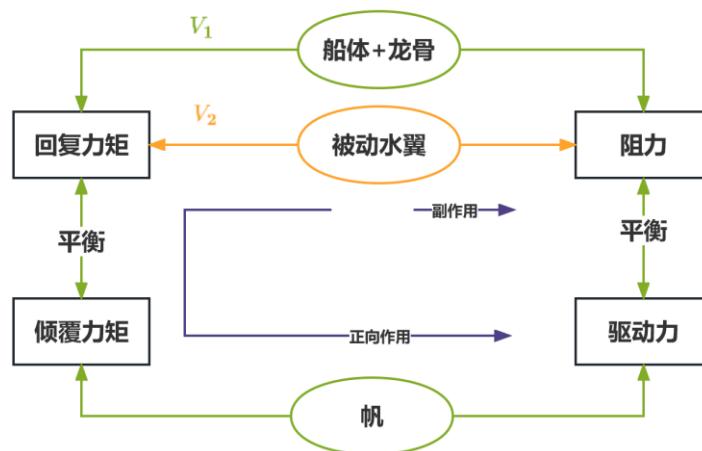


图 5-5 被动水翼对无人帆船航速性能的影响

Figure 5-5 The effect of passive hydrofoils on the speed of autonomous sailboats

虽然被动水翼在有人帆船中已经取得了很多的成功应用，如航速超过 50 节航速的 Hydroptère<sup>[202]</sup>、超过 65 节航速的 Sailrocket II<sup>[203]</sup>、取得了成功应用的 Dynamic Stability System (DSS) 装置，在 Vendée Globe 表现出色的加装水翼版本的 IMOCA 60 等。但是，当下被动水翼设计方面仍然面临一些问题，第一、在水翼方案方面并没有较为统一的配置，出于商业秘密或竞赛活动等原因，难以找到关于这些水翼的设计依据的相关资料。第二、现有的有人帆船水翼设计参数选取与一些历史结论存在矛盾——Amateur Yacht Research Society (AYRS) 的成员在 1970 年对被动水翼作为增稳机构进行过大量尝试和讨论后指出，被动水翼最好是大面积、低展弦比(AR)的。而目前流行的被动水翼(如 DSS, Dali-Moustache, Chistera 等)明显都是一些高 AR 的水翼。难以确定这种设计是由于级别规则限制导致的，还是完全基于性能考虑的。第三、由于无人帆船设计空间大、设计间的交叠小，因此很难在设计阶段得到无人帆船的先验性能估计，即无法给出 $V_1$ 和 $V_2$ 的大致估计，因此也无法根据 $V_1$ 和 $V_2$ 的值进行水翼的设计。基于以上论证和考虑，本文将结合有人帆船的水翼方案给出面向航速最优的无人帆船增稳水翼方案设计，并在此方案下讨论 AR 对水翼抗倾覆效能臂的影响；立足于上文第三章和第四章的无人帆船航速性能量化评价方法和设计方法，探究不同的水翼和帆配置对无人帆船的整体航速性能的影响。

## 5.4 面向航速最优的无人帆船增稳水翼方案设计

### 5.4.1 现有被动水翼配置评估

由于帆是一个在大多数真风角下同时产生动力和倾覆力矩的装置。帆船的速度潜力可以通过其最大回复力矩或稳定性来定义<sup>[204]</sup>。对于一般的帆船，其回复力矩(或稳定性)来自于重心位置和浸没宽度，对于装备了被动水翼的帆船，回复力矩还来自于水翼产生的动态升力。模仿船舶领域中将抵消船舶重力的形式以静浮力、水动力、空气动力分类的“支撑三角形(Sustention triangle)”<sup>[205]</sup>，我们将现有被动水翼帆船设计按稳定性的来源表示为图 5-6 所示的“稳定性三角形”。

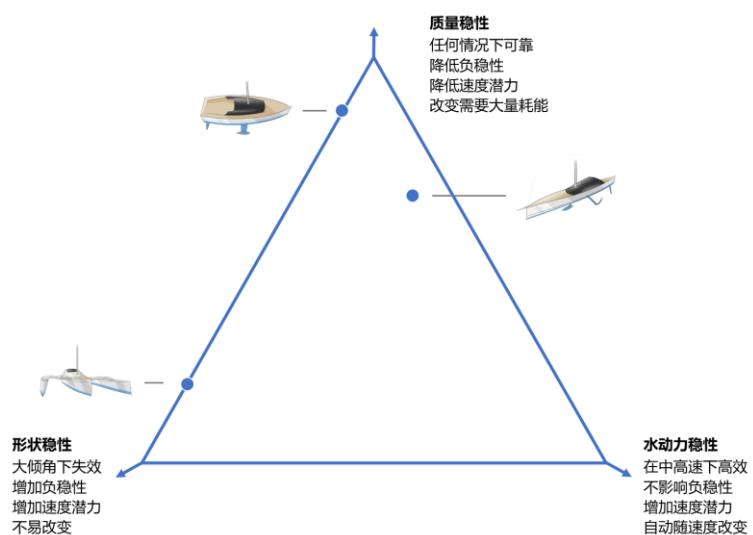


图 5-6 稳定性三角形  
Figure 5-6 The stability triangle

质量稳定性来自较低的重心位置。质量稳定性在任何倾角下总是可靠的，更大的质量稳定性在提升正浮稳定性的同时，也有效地降低了负稳定性。即使船舶倾覆，较低的重心位置(指正浮状态下，在倒浮重心则远高于水面)也可以保证在风浪的扰动下回正。这也是大多数无人帆船都采用单体形式，并配置长而重的龙骨的原因。过度依赖质量稳定性意味着过重的船体，可能导致航速性能的降低。质量稳定性的动态改变可以由大的质量变动实现(如可倾龙骨、动态压载水等)，但这种改变通常意味着大量的能耗。

形状稳定性来自浸没宽度。它主要与船体和附体的几何形状有关，这种效果只在一定的横倾角范围内是有效的。形状稳定性在提升正浮稳定性的同时也会同时提升负稳定性，一旦船只倾覆，其回正所需要的功几乎和导致其倾覆的功一样大(如图 5-7)。如双体船、三体船，依赖于形状稳定性可以让船体(片体)轻而窄，从而具备更好的速度潜力。形状稳定性较难进行改变，有潜力的方案包括一些伸缩机构<sup>[206]</sup>等，但是这些方案降低了结构耐久性和可靠性。

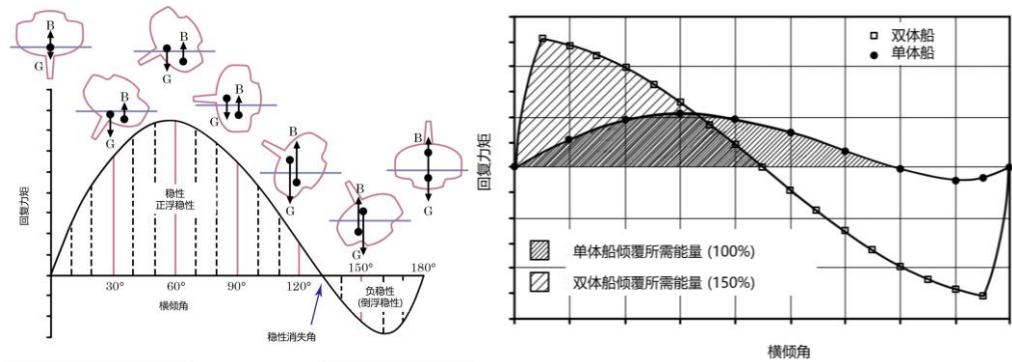


图 5-7 单体、双体船在正浮稳定性和倒浮稳定性之间的区别

Figure 5-7 The difference between positive and negative stability for monohulls and catamarans

水动力稳定性来自于水翼产生的升力。由于升力的产生依赖速度，因此水动力稳定性仅在中高速下才较为显著。水动力稳定性对负稳定性几乎无影响。水翼产生的水动力稳定的大小是天然动态变化的，这使得在更需要稳定的强风下(通常此时速度也更高)，水翼提供的额外稳定性也越大。而且，水翼升力能够部分抵消重力，减少船的吃水，增加航速潜力。

考虑到无人帆船大多数采用单体船的形式，我们主要对现有的被动水翼单体帆船设计进行分析。不同设计在稳定性来源方面都以质量稳定性为主，而在浮子带来的形状稳定性和水翼带来的水动力稳定性之间进行权衡。其大致可以分为三类：浮子与水翼共存的、浮子兼具水翼作用的以及只有单独水翼的。这些平台的介绍如下，并将其在较高航速和横倾下的稳定性构成情况绘制在图 5-9 的稳定性三角形中。

浮子与水翼共存的典型代表是 D. R. Robertson 改装后的 15 英尺单体帆船(图 5-8a)，和 Derek Norfolk 和 Rodney Garrett 改装过的三体船 SULU(图 5-8b)。前者采用水动力随船的倾角变化更平滑的水面割划翼，后者采用水翼性能更稳定的 T 型水翼。与多体船的主要区别是，这种配置中的浮子在正浮航行时并不浸没仅做储备稳定性使用。这种设计较为保守，能够在恶劣环境中提供更大的安全系数，但会略微增加船舶的负稳定性。

浮子兼具水翼作用的设计的典型代表是 Erick J. Manners 设计的 FLYING WING(图 5-8c)。它的独特之处在于其浮子同时也是一个低展弦比的水翼，可以同时提供形状稳定性和水动力稳定性，来保证该配置在各种速度下都有一定的作用。但是其代价是在各种速度下其性能都不是最优的。

只有单独的被动水翼的设计的典型代表是 Singleton 的 Foil-Stabilized Craft(图 5-8d)和目前比较知名的加装水翼版的 IMOCA 60(图 5-8e)。二者都采用了曲线型的水面割划翼，只是前者有相对更长的力臂，而后者可以产生大量的侧向力抵抗能力以弥补采用倾斜龙骨带来的侧向力抵抗能力不足。单独被动水翼的

设计提高了高速下的速度潜力，但是在低速区间内，浸没的水翼无法产生足够的水动力稳定性，且会带来阻力增加。

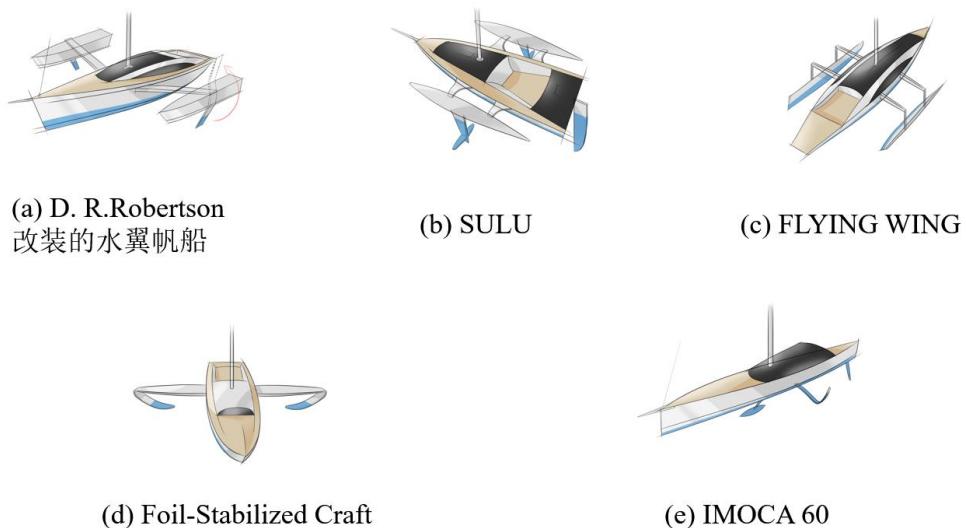


图 5-8 部分被动水翼帆船设计方案<sup>[201]</sup>  
Figure 5-8 Selected passive hydrofoil sailboat design concepts

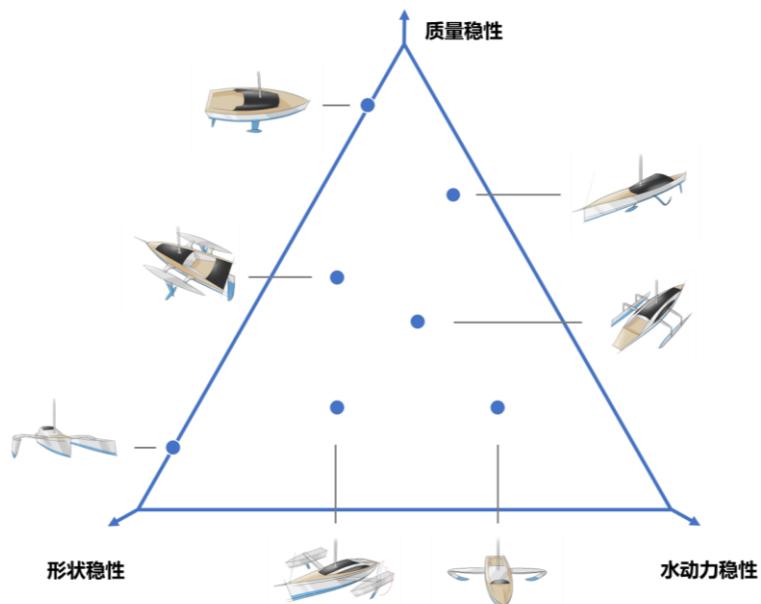


图 5-9 不同被动水翼配置的稳定性构成  
Figure 5-9 Comparison of different passive hydrofoil configurations

#### 5.4.2 面向航速最优的被动水翼增稳无人帆船方案

当以航速最优为目标设计被动水翼增稳无人帆船方案时，由于水翼可以提供动态的稳定性，因此具有高稳定性且会降低航速潜力的肥大型船体就不再是必选方案。本方案中采用了基于 Racing Sparrow 750 遥控帆船的纤细船体和长龙骨。这种配

置在具有较高的速度潜力同时拥有较多的质量稳定性，可以在任意横倾角、甚至倾覆后提供较多的回复力矩。在被动水翼方案方面，首先要考虑的就是避免在顺风、小风等横倾较小的情况下水翼的浸没。因为在这种状态下，无人帆船并不需要额外稳定性，而浸没的水翼会带来额外的阻力。再则，由于 T 型水翼受通气效应影响小，在浅浸时性能损失更小，因此方案采用如图 5-10 所示的倾斜的 T 型水翼来保证水翼在无人帆船需要额外稳定性(较大横倾时水翼才会浸水)。此外，考虑到海上多变恶劣的环境，额外的稳定性冗余是必要的，此时类似 SULU 的浮子设计就成为了较好的选择，方案中的浮子在正常工作下并不浸没，不增加额外的阻力，而在横倾过大或遇到阵风引起的大幅度横摇时，浮子能够提供大量的额外回复力矩。

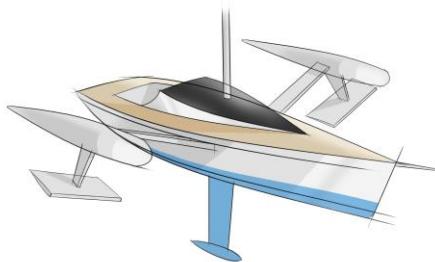


图 5-10 水翼增稳无人帆船方案

Figure 5-10 Comparison of different passive hydrofoil configurations

平台主尺度及安装尺寸如图 5-11, 5-12 及表 5-2 所示。根据空气动力学方面的知识，通常来说，更高 AR 的水翼具有更高的效率(更高的升阻比)。但是在水翼设计中，考虑到浅浸效应，通气，喷溅阻力等一系列因素<sup>[207]</sup>，高 AR 方案不见得是最优解。Edmund Bruce 等人<sup>[201]</sup>通过许多实船测试及试验指出，被动水翼最好是大面积低 AR 的，因为它可以最大程度的减少由于通气造成的影响。而现有的有人帆船水翼设计都是高 AR 的，但是由于这些水翼帆船大多出于竞赛或商业目，相关的设计资料是不公开的，因此造成这种设计理念上的差异的原因尚不明确。其中一种可能是这些设计受制于级别规则的限制，而另一种可能是这些竞赛帆船通常航行在较 Edmund Bruce 等人所用的帆船更高的 Fr 下带来了水翼效能方面的差异<sup>[208]</sup>。为了对不同 AR 的水翼的效能进行探索，方案设计了三种展弦比的水翼备选，分别对应 AR=1.8、2.4、3。

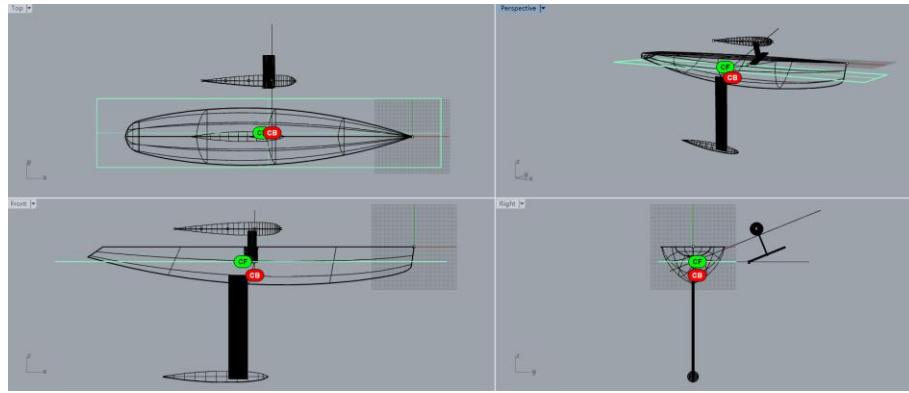


图 5-11 设计方案三维图  
Figure 5-11 3D view of the design scheme

表 5-2 水翼无人帆船设计参数

Table 5-2 Design parameters of the hydrofoil-assist autonomous sailboat

平台			
重量 (kg)	Lwl (mm)	VCG (mm)	吃水(mm)
1.8+0.2	735	-118 (裸船) -108 (带水翼)	285 (裸船) 288 (带水翼)
水翼			
翼型	展长 (mm)	弦长 (mm)	安装角度 (°)
NACA 63-412	92.3	51.3/38.5/ 30.1	20
安装攻角 (°)	横向安装位置 (mm)	纵向安装位置 (Lpp)	
0	150	48%	

## 5.5 水翼增稳机构的效能研究

由于在本文的水翼方案中在顺风、小横倾角时水翼几乎不浸没，因此本文着重对迎风、大横倾角下不同设计参数的水翼的增稳效果和对整体航速性能的影响进行了探索，以对水翼的增稳能效和设计准则进行探索。

### 5.5.1 基于水动力仿真的水翼增稳效能研究

由于水翼性能涉及到众多复杂的流体现象，难以由理论推导或经验公式直接得到其性能，在本文中采用 RANS 仿真得到对不同 AR 水翼设计在中低 Fr 下的性能进行评估。Fr 的范围被限定为[0.1, 0.4]，待评估的水翼均为图 5-11 中的形式，其展长不变均为 92.3 mm，弦长分别为 51.3mm、38.5 mm、30.1 mm 对应 AR 为 1.8、2.4、3。待评估的横倾角  $\theta$  为[10, 12, 15, 18, 20] 度，其中 20 度时水翼完全浸没而浮子并未触水。偏航角  $\lambda$  被设置为 3 度，这是一个帆船运行的典型偏航角 [209]。

水翼的增稳性能与增加阻力的评估由以下方法得出：第一步，利用静水力软件分别计算出不带水翼和带有水翼的船体在不同姿态下的吃水等信息；第二步，

分别对相同姿态的二者进行锁定除纵荡外所有自由度的 CFD 仿真，得到阻力和回复力矩的差值。锁定其他自由度是为了尽量减少计算代价，其合理性来自以下两方面：一方面，文献<sup>[210]</sup>指出在  $Fr < 0.35$  的范围内，水翼产生的水动力对横倾、纵倾和吃水(垂荡)的变化都影响不大，而本文中没有考虑可以起到较大影响偏航平衡的舵，因此采用一个典型偏航角( $3^\circ$ )并默认其平衡；另一方面，在  $Fr > 0.35$  的区间上，虽然水翼产生的升力会稍微降低帆船的吃水，降低帆船的阻力，但是我们更关心的是水翼由增稳带来的贡献，继而姑息了这对水翼效能的影响和低估。具体 CFD 设置如下：

主船体的 CFD 仿真采用模型尺度比为 1:1 的同比计算模型，具体模型如下图 5-12 所示。其中，虚拟边界所包围的长方体区域为 CFD 计算的流域。为保证流场充分发展而不受边界的影响，且高效利用计算资源，计算域尺寸设置如下：船体前方为速度入口，距船艏 5 倍船长；后方设为压力出口，距船尾 15 倍船长；四周为滑移壁面，相距 10 倍船长。采用雷诺平均纳维-斯托克斯方程(RANS)和  $k-\varepsilon$  湍流模型对船体周围流场进行非定常计算。利用 VOF 波模型来模拟静水波，并采用相对应的场函数给定初始条件和边界条件。利用体积分数来捕捉自由液面，自由液面的初始位置利用当前设计的重量值(船体+帆+水翼)在静水力曲线中插值得到，其中静水力曲线由相关静水力软件在仿真前计算得到。

图 5-13 给出了船体计算域的网格离散示意图，采用 Trimmed cell mesher 进行计算网格离散，在远离船体处设置较为粗糙的网格尺寸，在船体周围区域设置加密区，特别是在水翼附近区域设计加密域来捕捉水翼对流动的影响。在壁面处设置边界层网格，且保证壁面  $Y^+$  值小于 5。为了较精确的捕捉水动力特性。我们对自由液面和船体后船行波域进行了加密，网格总数为 304 万。

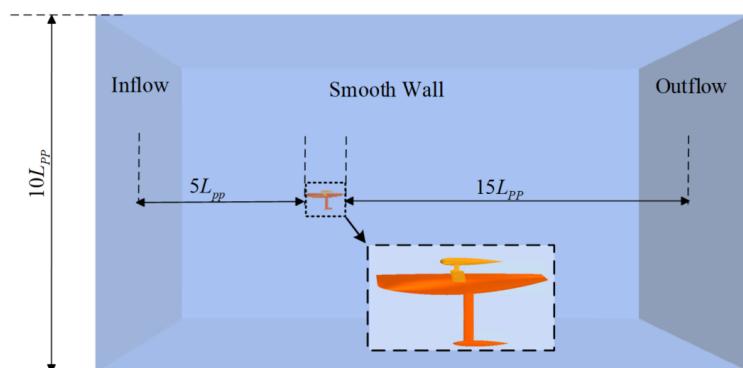


图 5-12 计算域设置  
Figure 5-12 Setup of the computational domain

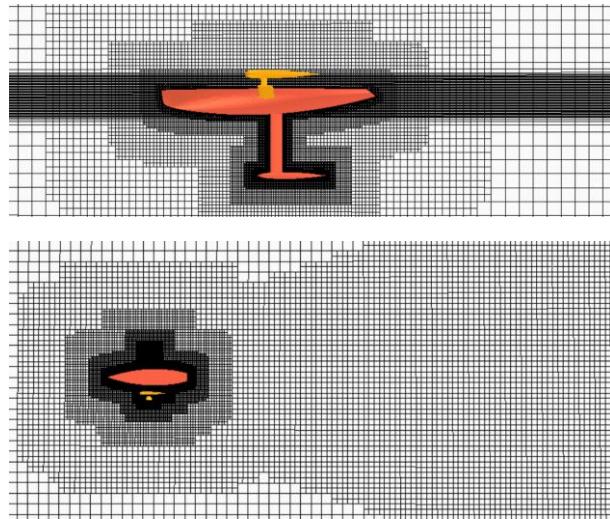


图 5-13 网格设置

Figure 5-13 Mesh settings

图 5-14 展示了 AR=3 的水翼配置在横倾 20 度时的阻力增加和回复力矩增加情况。在阻力方面，Fr 在 [0, 0.4] 的区间内阻力增加在 10%-16% 左右。随着 Fr 的增加，水翼带来的增阻占比呈现先增后减的趋势，这是因为在 Fr>0.3 后裸船的阻力增长较快。在回复力矩方面，带有水翼的船体和不带有水翼的船体的回复力矩都随 Fr 的增加而降低，这主要由于在较高的速度下船体两侧流场的不均匀性引起了其回复力矩的降低，其效果取决于船体的  $C_b$ <sup>[211]</sup>。而水翼产生的回复力矩是随 Fr 增加的，因此导致了在高速下水翼提供的额外回复力矩的占比上升。这部分的仿真结果可以很好的与文献<sup>[209]</sup>中的部分结论相印证，在该文献中，水翼提供的回稳力矩随 Fr 的增加快速上升(但该文献没有给出裸船体和水翼具体的值)。

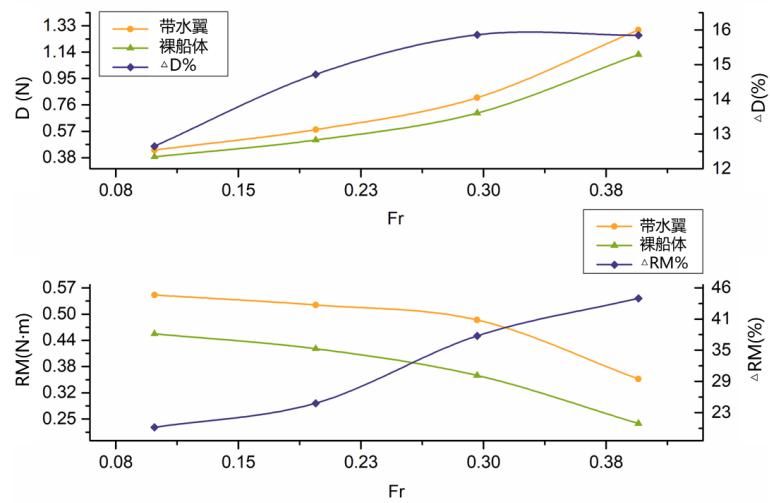


图 5-14 被动水翼对回复力矩和阻力的影响 (以 AR=3,  $\theta=20$  为例)  
Figure 5-14 Influence of passive hydrofoils on recovery moments and drag  
(take AR=3,  $\theta=20$  as an example)

图 5-15 展示了 AR=3 的水翼配置在不同 Fr 和横倾角下的阻力增加和回复力矩增加情况。在阻力方面，由于在小横倾角低速(小 Fr)下船的阻力较小，因而水翼增阻占比较大。而在大 Fr 下，由于小倾角下水翼并未完全浸没，所以其增阻很小，而裸船阻力随 Fr 的增大而增大较快，因此增阻占比下降。而在较大倾角下，水翼完全浸没。由于船体本身因横倾受到的阻力大幅增加，因此水翼的阻力增大不明显。水翼的增阻占比出现先升后降的趋势。在回复力矩增加方面，所有角度下水翼提供的额外回复力矩占比都增加了，如上文所述，这来自于水翼效果随 Fr 的增加以及船体回复力矩随 Fr 增加而降低的共同作用。而更小倾角下的水翼增阻百分比更大则是因为在小横倾下裸船体的回复力矩更小。

图 5-16 展示了裸船体以及三种不同水翼配置的抗倾覆效能臂。裸船体的抗倾覆效能臂呈现出了明显的随航速增加而增加，随横倾增加而增加的特性，这是符合预期的，因为同航速下横倾越大提供的回复力矩越大。而同横倾下，回复力矩随速度降低，阻力升高。对于水翼，抗倾覆效能臂随着航速的增加而减小，这是因为可以提供的回复力矩随速度的增长不如阻力快。此外水翼的抗倾覆效能臂(在我们的设计方案下)在高倾角下有更大的性能良好的区间。理论上来讲，只要水翼带来抗倾覆效能臂优于此时裸船体的抗倾覆效能臂，水翼就能对航速性能起到正面效果。三种水翼配置的抗倾覆效能臂明显在评估的整个域内都大于船体的抗倾覆效能臂。而水翼设计间的横向比较可以看出，低 AR 下效能更好。

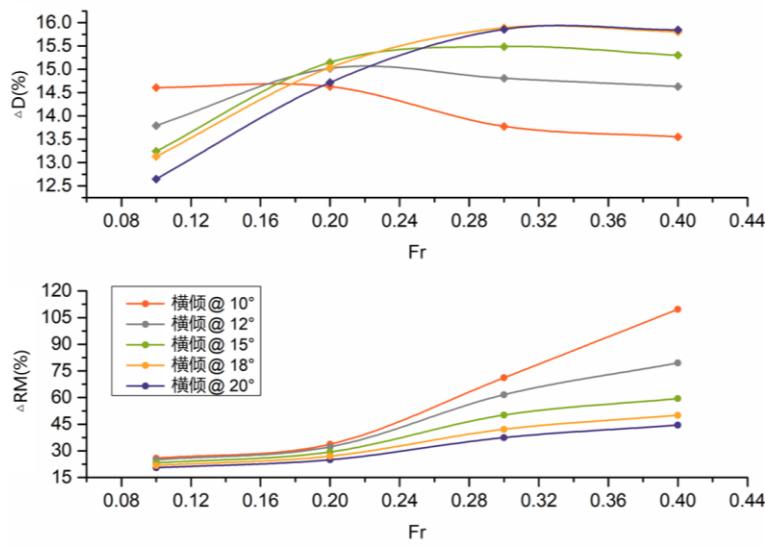


图 5-15 不同横倾角下被动水翼对回复力矩和阻力的影响

**Figure 5-15 Influence of passive hydrofoils on recovery moments and drag forces at different heeling angles**

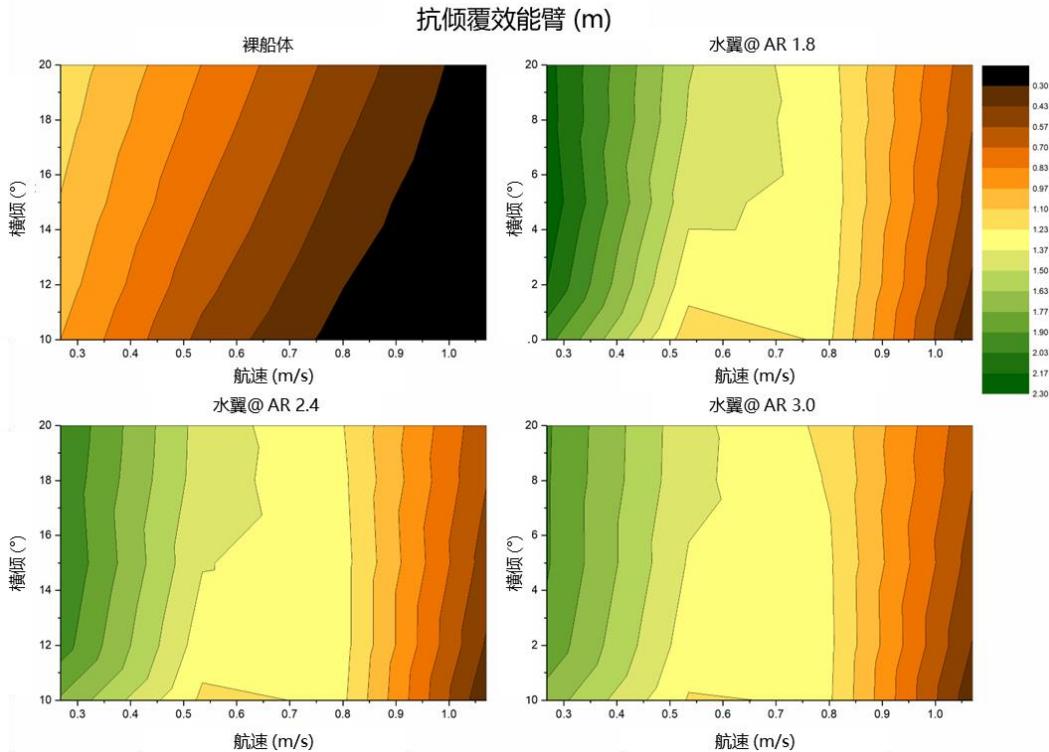


图 5-16 裸船体与不同水翼配置的“抗倾覆效能臂”

**Figure 5-16 'Overturning resistance efficient arm' of bare hull and different hydrofoil configurations**

### 5.5.2 基于性能量化评价的水翼增速效能研究

上述的结论仅仅是对通过对船体和水翼在固定姿态的水动力仿真中得出的。由于帆船性能与其总体设计以及外界环境的耦合性，帆船最终稳定航行时出于何种姿态和航速靠这种方法是无法估计的。举例来说，在横倾[10, 20]度，Fr 在[0.1, 0.4]时加装水翼是有益的，但是对于一个帆船来讲，其平稳航行时，其航速和姿态是否落在这个区间内是无法确定的。因此，我们进一步将帆计入考虑，对水翼对整体的航速进行研究。

类似“抗倾覆效能臂”，可以定义一个“倾覆效能臂”，其是倾覆力矩与驱动力的比值，出于速度最优考虑，我们希望倾覆效能臂越小越好。帆的展长会影响倾覆力矩的力臂同时也通过展弦比影响动力的产生，我们给出了 AR 相同，面积不同的两个帆的方案以规避这种展长和弦长同时变化的影响。两个帆分别为弦长 267mm、187 mm，展长 600 mm、420 mm。我们只研究了迎风状态( $TWA=50^\circ$ )下的帆性能，这是因为本文的水翼配置在顺风、小横倾下时几乎不会对性能造成影响。

翼帆的 CFD 仿真与船体仿真相似。只有在迎风下横倾才会较大，所以 CFD 计算只考虑迎风风向情况，同样采用长方体计算域，长 40 倍舷长，高 30 倍舷长，宽 30 倍舷长。外围采用粗糙尺度网格，帆周围采用精细网格，并对尾流加

密处理，经过网格无关性测试计算，最终网格数为 290 万。翼帆与船体的惯性坐标系相同，且相对位置与实际保持一致，并将计算所得的翼帆产生空气动力和船体产生的 6 自由度水动力和力矩投影到惯性坐标系中，进行合并，得到水翼帆船整体的受力情况。

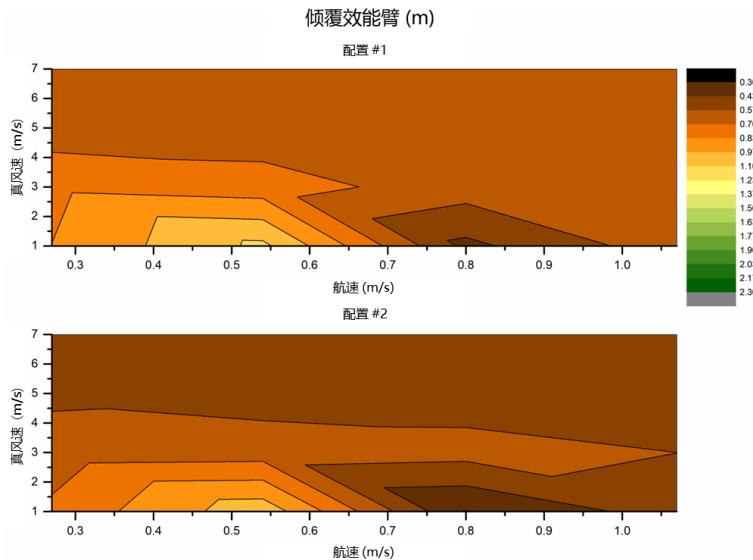


图 5-17 两种帆配置的“倾覆效能臂”

Figure 5-17 ' Overturning efficient arm' of two sail configurations

图 5-17 展示了两种帆配置(配置 1 为较大的帆)在不同风速、航速下，横倾 20 度时的倾覆效能臂。由图中可以看出，对于一个特定的帆，在较小的风速下其存在一个倾覆效能臂较优(较小)的区间和一个倾覆效能臂较差(较大的区间。且同 AR 更矮的帆倾覆效能臂更优。

本节综合了第三章第四章的部分方法，采用了全仿真的 VPP 来得到不同水翼设计对整体航速性能的影响，由于本文的水翼配置在顺风、小横倾的状态下不会产生较多的额外阻力，这里主要是对迎风下航速性能的影响。其总体流程如图 5-18，为了评估无人帆船的航速性能，本节没有采用如第三章提出的 VPP 中给定外界环境，通过求解器求解航速与姿态的形式。而是将横倾限制在许用值 20 度，去求解无人帆船能够承受的最大风速和相应的速度。此外我们利用了第四章所提出的贝叶斯优化策略，来进行高效的全 CFD 仿真。每种设计的最大航速和能正常航行的极限风速如表 5-3 所示。结果表明与上一节的预期一致，几种水翼设计在风速可以使平台达到最大横倾时都能有效的提升无人帆船的航速，且 AR 较小的水翼效果更好。同时对于帆，同 AR 下，当风速可以使平台达到最大横倾时，更小的帆将平台抗倾覆能力转化为航速的性能更强。

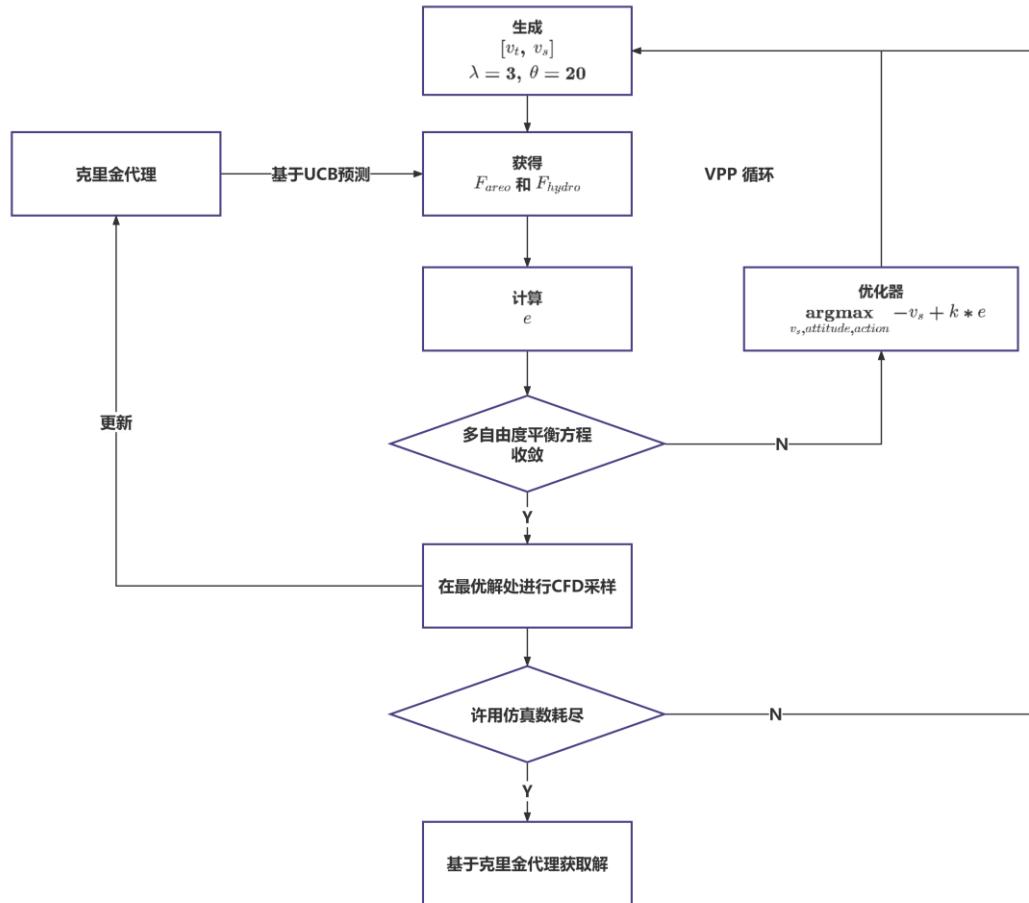


图 5-18 最大航速评估流程图

Figure 5-18 Flow chart for maximum speed estimation

表 5-3 不同水翼和帆配置对航速(迎风)的影响

Table 5-3 Effect of different hydrofoil and sail configurations on upwind speed performance

设计	帆配置 1 (267 mm * 600 mm)		帆配置 2 (187 mm * 420 mm)	
	最大航速 (m/s)	极限风速(m/s)	最大航速(m/s)	极限风速(m/s)
裸船	0.841	4.382	0.918	6.572
水翼 AR=3	0.912	5.043	0.983	7.551
水翼 AR=2.4	0.922	5.077	0.987	7.638
水翼 AR=1.8	0.934	5.139	0.994	7.782

本章的研究忽略了升沉运动，而水翼造成的抬升是对阻力有利的，所以本章所得到的结论是偏向保守的。但本章的研究证明了在保守的前提下，水翼也能有效的增稳增速。在后续的研究中，我们可能会加入更多的自由度或进行水池试验等进行对比研究。

## 5.6 本章小结

本章针对无人帆船的抗倾覆能力无法随外界改变,从而导致在设计中航速性能与抗倾覆能力尖锐对立的现状,系统地介绍可使无人帆船抗倾覆能力随外界环境改变的环境自适应机构、评估多种环境自适应机构与无人帆船的适配性、选择并设计了被动水翼增稳无人帆船方案、探索了被动水翼的效能。

本章依据所建立的被动水翼无人帆船“稳定性三角型”设计评估模型,设计了一型被动水翼增稳无人帆船方案。分析了不同展弦比被动水翼的增稳、增阻规律,评估了被动水翼对无人帆船的增速效能。本章验证了利用增稳水翼优化无人帆船航速性能的可行性,得到的设计结论可以为后续的设计工作提供参考和指导。

## 第6章 结论与展望

无人帆船是一种长续航力、具有良好水声性能的海洋观测平台，能够有效的补强现有的海洋观测系统。为了使无人帆船在保证生存性的同时具有较高的海洋观测效率和强流区域通过性，本文依托“新型水翼无人帆船”课题（Y8K7080702），系统的对面向航速性能的无人帆船的设计评价、设计方法、设计改进等的问题进行了深入的研究。据作者所知，本文是第一篇系统对无人帆船设计及优化相关内容进行研究的博士论文。

本文的主要工作如下：

1. 以性能的视角梳理和分析了无人帆船的设计现状，介绍了面向航速性能的无人帆船设计评价和设计方法方面的现状与不足，指出了当前无人帆船的性能短板在其航速性能方面，且航速性能受到抗倾覆能力的制约。对无人帆船设计中航速性能和抗倾覆能力进行了量化评价，并探讨了对立关系的产生、不平衡的原因以及阻碍寻求更优权衡的因素。提出了“利用计算流体力学仿真与仿真驱动设计技术寻求航速性能与抗倾覆能力在尖锐对立下的最优权衡”和“提高无人帆船的抗倾覆能力的环境适应性，以寻求缓和航速性能与抗倾覆能力的尖锐对立，以间接提高航速”的两条航速性能提升路线。相关研究为面向航速提升的无人帆船设计工作提供了理论和逻辑基础。

2. 针对现有评价机制与无人帆船不匹配产生的评价失准的问题，本文提出了一种基于计算流体力学仿真和优化求解器的无人帆船航速性能评价方法，采用计算流体力学仿真建立水动力和空气动力模型使得该方法可以对任意无人帆船设计进行评价，优化求解器的引入保证了在没有先验性能信息的情况下也能得到准确的设计性能评价。相关研究为无人帆船设计间的横向比较提供了方法，为面向航速提升的无人帆船设计工作提供了工具基础。

3. 针对无人帆船设计工作中因缺乏系统的设计优化方法而导致难以在航速性能与抗倾覆能力的尖锐对立中获得最优权衡的现状，本文提出了一种基于贝叶斯优化和知识迁移的无人帆船仿真驱动设计框架。该方法可以基于计算流体力学仿真在抗倾覆能力约束下找到航速性能最优设计。相关研究为面向航速无人帆船的总体设计优化提供了有效工具，为在抗倾覆能力和航速性能的对立中找到二者更优权衡提供了可行的方法。

4. 针对无人帆船的抗倾覆能力无法随外界改变，从而导致在设计中航速性能与抗倾覆能力尖锐对立的现状。系统地介绍可使无人帆船抗倾覆能力随外界环境改变的环境自适应机构、评估多种环境自适应机构与无人帆船的适配性、选择并设计了被动水翼增稳无人帆船方案、探索了被动水翼的效能。相关研究验证了利用增稳水翼优化无人帆船航速性能的可行性，得到的设计结论可以为后续的设计工作提供参考和指导。

本文的主要创新点如下：

1. 在所提出无人帆船设计的航速性能评价方法中，创新的对标准遗传算法求解器进行了改进，通过增加末位淘汰模块有效的提高了求解器在缺乏性能先验条件下的求解收敛速度。同时，本章还提出了一个基于邻域信息的优化策略，其可以利用相关状态间的自然关联性显著的提升性能量化评价精度并限制减少所需的计算量。

2. 在所提出的面向航速最优的无人帆船设计方法中，创新的引入贝叶斯优化，解决了因无人帆船设计中设计空间大、缺乏先验性能估计导致所需计算流体力学仿真采样数“维度灾难”的问题。创新的引入知识迁移模块，实现了对设计优化过程中信息的高效复用，提高了设计优化过程的效率。

3. 在面向无人帆船航速提升的增稳机构优化设计研究中，建立了被动水翼无人帆船“稳定性三角型”设计评估模型，并依据该模型设计了一型被动水翼增稳无人帆船方案。分析了不同展弦比被动水翼的增稳、增阻规律，评估了被动水翼对无人帆船的增速效能。

未来工作展望：

1. 本文中，无人帆船设计的航速性能量化评价是基于静水状态下的水动力模型得到的。尽管从“指导设计”的角度来看，这种做法被认为是可以接受的，且符合有人帆船设计领域的惯例，但从“性能预测”的角度来说，忽略波浪的影响会造成一定程度的误差。因此在后续的工作中将考虑在不增加过多的计算代价的前提下加入波浪阻力模型，或采用有效方法对现有方法进行校准。

2. 本文利用所提出的无人帆船设计方法对“海鸥号”进行了面向航速性能的设计优化。尽管在仿真环境中，新的设计取得了远好于原设计的航速性能，但由于成本和工程耗时问题，并未进行实航验证。在后续的工作中，计划制造可以进行组件更换的模块化样机，通过合理的试验设计，对设计优化的效果进行实航验证。

3. 本文设计了增稳水翼无人帆船方案，验证了利用增稳水翼间接提升无人帆船航速性能的可行性。然而由于成本和工程耗时问题，并未进行实航验证。在后续的工作中，计划制造相应的原理样机进行实际验证。

## 参考文献

- [1] 吴立新、陈朝晖、林霄沛、刘永正.“透明海洋”立体观测网构建[J]. 科学通报, 2020, 65(25): 8.
- [2] Expédition du Challenger[Z]/Wikipédia. 2021.
- [3] Woodruff S D, Diaz H F, Worley S J, et al. Early Ship Observational Data and Icoads[J]. Climatic Change, 2005, 73(1-2): 169-194.
- [4] HMS Beagle[Z]/Wikipédia. 2021.
- [5] Smith S R, Alory G, Andersson A, et al. Ship-Based Contributions to Global Ocean, Weather, and Climate Observing Systems[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 434.
- [6] Chai F, Johnson K S, Claustre H, et al. Monitoring ocean biogeochemistry with autonomous platforms[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020.
- [7] Stelzer R, Jafarmadar K. The robotic sailing boat asv roboat as a maritime research platform[C]/Proceedings of 22nd international HISWA symposium. 2012.
- [8] Wetterfunkgerät Land[Z]/Wikipédia. 2021.
- [9] Papa Background | Ocean Climate Stations[EB/OL]. [2021-10-15]. <https://www.pmel.noaa.gov/ocs/papa-background>.
- [10] Argo - Home[EB/OL]. [2021-10-21]. <https://www.aoml.noaa.gov/phod/argo/>.
- [11] Soreide N, Woody C, Holt S. Overview of ocean based buoys and drifters: present applications and future needs[C]/MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 01CH37295): Vol. 4. IEEE, 2001: 2470-2472.
- [12] Kilpin G. Modelling and design of an autonomous sailboat for ocean observation[D]. University of Cape Town, 2014.
- [13] Mouton L, Leroyer A, Deng G B, et al. Towards Unsteady Approach for Future Flutter Calculations[J]. Journal of Sailing Technology, 2018, 3(01): 1-19.
- [14] Dunbabin M, Marques L. Robots for Environmental Monitoring: Significant Advancements and Applications[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2012, 19(1): 24-39.
- [15] Shu Y, Xiu P, Xue H, et al. Glider-observed anticyclonic eddy in northern South China Sea[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2016, 19(3): 233-241.
- [16] Brett A, Leape J, Abbott M, et al. Ocean data need a sea change to help navigate the warming world[Z]. Nature Publishing Group, 2020.
- [17] Cruz N A, Alves J C. Autonomous sailboats: An emerging technology for ocean sampling and surveillance[C]/OCEANS 2008. IEEE, 2008: 1-6.
- [18] Cokelet E D, Meinig C, Lawrence-Slavas N, et al. The use of Saildrones to

- examine spring conditions in the Bering sea: Instrument Comparisons, Sea Ice Meltwater and Yukon River Plume Studies[C]//OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington. IEEE, 2015: 1-7.
- [19] De Robertis A, Lawrence-Slavas N, Jenkins R, et al. Long-term measurements of fish backscatter from Saildrone unmanned surface vehicles and comparison with observations from a noise-reduced research vessel[J]. ICES Journal of Marine Science, 2019, 76(7): 2459-2470.
  - [20] Cross J N, Mordy C W, Tabisola H M, et al. Innovative technology development for Arctic Exploration[C]//OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington. Washington, DC: IEEE, 2015: 1-8.
  - [21] Ghani M H, Hole L R, Fer I, et al. The SailBuoy remotely-controlled unmanned vessel: Measurements of near surface temperature, salinity and oxygen concentration in the Northern Gulf of Mexico[J]. Methods in Oceanography, 2014, 10: 104-121.
  - [22] Meinig C, Lawrence-Slavas N, Jenkins R, et al. The use of Saildrones to examine spring conditions in the Bering Sea: Vehicle specification and mission performance[C]//OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington. Washington, DC: IEEE, 2015: 1-6.
  - [23] SailBuoy - Unmanned Surface Vessel[EB/OL]. (2020)[2021-06-07]. <http://www.sailbuoy.no/>.
  - [24] Miller P, Hamlet M, Sauzé C, et al. MaxiMOOP: A Multi-Role, Low Cost and Small Sailing Robot Platform[M]//Morgan F, Tynan D. Robotic Sailing 2014. Cham: Springer International Publishing, 2015: 17-30.
  - [25] Miller P, Beeler A, Cayaban B, et al. An Easy-To-Build, Low-Cost, High-Performance SailBot[M]//Morgan F, Tynan D. Robotic Sailing 2014. Cham: Springer International Publishing, 2015: 3-16.
  - [26] Klinck H, Stelzer K, Jafarmadar K, et al. AAs endurance: An autonomous acoustic sailboat for marine mammal research[C]. 2009.
  - [27] Mordy C, Cokelet E, De Robertis A, et al. Advances in Ecosystem Research: Saildrone Surveys of Oceanography, Fish, and Marine Mammals in the Bering Sea[J]. Oceanography, 2017, 30(2).
  - [28] Cruz N, Alves J C. Ocean sampling and surveillance using autonomous sailboats[C]//Proceedings of the 1st International Robotic Sailing Conference. 2008.
  - [29] Rynne P F, von Ellenrieder K D. Unmanned autonomous sailing: Current status and future role in sustained ocean observations[J]. Marine Technology Society Journal, 2009, 43(1): 21-30.
  - [30] Vazquez-Cuervo J, Gomez-Valdes J, Bouali M, et al. Using saildrones to validate satellite-derived sea surface salinity and sea surface temperature along the California/Baja Coast[J]. Remote Sensing, 2019, 11(17): 1964.

- 
- [31] Corporation B. SKAMP[M]. Bonnier Corporation, 1970.
  - [32] Elkaim G H. System identification for precision control of a wingsailed gps-guided catamaran[J]. A Dissertaton Submitted to the Department of Aeronautics and Astronautics and the Committee on Graduate Studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2001.
  - [33] Abril J, Salom J, Calvo O. Fuzzy control of a sailboat[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 1997, 16(3-4): 359-375.
  - [34] Elkaim G H. The Atlantis Project: A GPS-Guided Wing-Sailed Autonomous Catamaran[J]. Navigation, 2006, 53(4): 237-247.
  - [35] Stelzer R, Jafarmadar K. History and recent developments in robotic sailing[M]//Robotic sailing. Springer, 2011: 3-23.
  - [36] Microtransat-History[EB/OL]. (2020)[2021-06-07].  
<https://www.microtransat.org/history.php>.
  - [37] Silva M F, Fribe A, Malheiro B, et al. Rigid wing sailboats: A state of the art survey[J]. Ocean Engineering, 2019, 187: 106150.
  - [38] AMS[EB/OL]. [2022-04-15]. <https://www.automarinesys.com/history>.
  - [39] Lockheed Martin Ventures Invests in Ocean Aero, Strengthening Focus on Unmanned Maritime Systems - Sep 15, 2017[EB/OL]. [2022-04-15].  
<https://news.lockheedmartin.com/2017-09-15-Lockheed-Martin-Ventures-Invests-in-Ocean-Aero-Strengthening-Focus-on-Unmanned-Maritime-Systems>.
  - [40] PLATFORM — Autonomous Marine Systems[EB/OL]. (2019)[2021-06-07].  
<https://www.automarinesys.com/datamaran>.
  - [41] Tasevski S. Lockheed Ups Stake in Ocean Autonomy Company Ocean Aero[EB/OL]. [2022-04-17]. <https://dronebelow.com/2018/08/30/lockheed-ups-stake-in-ocean-autonomy-company-ocean-aero/>.
  - [42] Fer I, Peddie D. Near surface oceanographic measurements using the SailBuoy[C]//2013 MTS/IEEE OCEANS-Bergen. IEEE, 2013: 1-15.
  - [43] Wind & Solar Powered Autonomous Vehicles – Saildrone[EB/OL]. [2022-04-17]. <https://www.saildrone.com/technology/vehicles>.
  - [44] Diard M B, Bishop S P, Donohue K A. Wintertime Surface Heat and Momentum Fluxes in the Gulf Stream from Saildrone Observations[J]. SURFO Technical Report No. 19-02, 2019: 1.
  - [45] Sutton A J, Williams N L, Tilbrook B. Constraining Southern Ocean CO<sub>2</sub> flux uncertainty using uncrewed surface vehicle observations[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(3): e2020GL091748.
  - [46] Saildrone Surveyor[EB/OL]. (2021)[2021-07-14].  
<https://www.saildrone.com/news/surveyor-completes-first-trans-pacific-ocean-mapping-mission>.
  - [47] Mayflower Autonomous Ship[EB/OL]. [2023-03-26]. <https://mas400.com/>.

- [48] Navy Wants 100 Unmanned Ships Monitoring Middle East Waters by Next Year - USNI News[EB/OL]. [2023-03-29]. <https://news.usni.org/2022/10/11/navy-wants-100-unmanned-ships-monitoring-middle-east-waters-by-next-year>.
- [49] UNE Discovery | Tall Ship Physics – Or, A Very Brief Introduction to Sailing a Square-Rigger[EB/OL]. [2023-03-29]. <https://www.unediscoveryvoyager.org.au/2018/01/19/tall-ship-physics/>.
- [50] On board Oceanco's 106 metre sailing superyacht Black Pearl[EB/OL]. [2022-04-17]. <https://www.boatinternational.com/yachts/editorial-features/iconic-yacht-black-pearl>.
- [51] Wilson R M. The physics of sailing[J]. JILA and Department of Physics, Colorado. University of Colorado, Boulder, 2010: 1998-2010.
- [52] Radhakrishnan V. From square sails to wing sails: The physics of sailing craft[J]. Current Science, 1997, 73: 503-516.
- [53] High-performance sailing[Z]/Wikipedia. 2023.
- [54] Iceboat[Z]/Wikipedia. 2023.
- [55] Points of Sail Diagram | Latitudes and Attitudes Magazine[EB/OL]. [2023-03-14]. <https://latsatts.com/2014/01/points-of-sail/>.
- [56] Voosen P. Saildrone fleet could help replace aging buoys[M]. American Association for the Advancement of Science, 2018.
- [57] Domínguez-Brito A C, Valle-Fernández B, Cabrera-Gámez J, et al. A-TIRMA G2: An Oceanic Autonomous Sailboat[M]/Friebe A, Haug F. Robotic Sailing 2015. Cham: Springer International Publishing, 2016: 3-13.
- [58] Sauze C, Neal M, others. An autonomous sailing robot for ocean observation[J]. proceedings of TAROS, 2006: 190-197.
- [59] Sauzé C, Neal M. MOOP: A Miniature Sailing Robot Platform[M]/Schlaefer A, Blaurock O. Robotic Sailing. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 39-53.
- [60] Leloup R, Le Pivert F, Thomas S, et al. Breizh spirit, a reliable boat for crossing the atlantic ocean[M]/Robotic Sailing. Springer, 2011: 55-69.
- [61] Neal M. A Hardware Proof of Concept of a Sailing Robot for Ocean Observation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(2): 462-469.
- [62] Guo Y, Romero M, Ieng S H, et al. Reactive path planning for autonomous sailboat using an omni-directional camera for obstacle detection[C]/2011 IEEE International Conference on Mechatronics. Istanbul, Turkey: IEEE, 2011: 445-450.
- [63] Miller P, Sauzé C, Neal M. Development of ARRTOO: a long-endurance, hybrid-powered, oceanographic research vessel[M]/Robotic Sailing 2013. Springer, 2014: 53-65.
- [64] Naveau M, Anthierens C, Pauly E, et al. MARIUS: Design of a sailbot for oceanographic missions[C]. Oceans, 2013.

- 
- [65] Friebe A. Havsforskningsplattform-Åland Sailing Robots[R]. 2019.
  - [66] Friebe A, Olsson M, le Galic M, et al. A marine research ASV utilizing wind and solar power[C]//OCEANS 2017 - Aberdeen. Aberdeen: IEEE, 2017: 1-7.
  - [67] Giger L, Wismer S, Boehl S, et al. Design and construction of the autonomous sailing vessel avalon[C]//Proceedings of The World Robotic Sailing Championship and International Robotic Sailing Conference. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2009.
  - [68] Ménage O, Bethencourt A, Rousseaux P, et al. Vaimos: Realization of an autonomous robotic sailboat[M]//Robotic Sailing 2013. Springer, 2014: 25-36.
  - [69] Miller P H, Hamlet M, Rossman J. Continuous improvements to USNA sailbots for inshore racing and offshore voyaging[M]//Robotic Sailing 2012. Springer, 2013: 49-60.
  - [70] Tretow C. Design of a free-rotating wing sail for an autonomous sailboat[M]. 2017.
  - [71] Sliwka J, Nicola J, Coquelin R, et al. Sailing without wind sensor and other hardware and software innovations[M]//Robotic Sailing. Springer, 2011: 27-38.
  - [72] Rynne P F, von Ellenrieder K D. Unmanned autonomous sailing: Current status and future role in sustained ocean observations[J]. Marine Technology Society Journal, 2009, 43(1): 21-30.
  - [73] CUSail | Fleet[EB/OL]. [2021-03-08]. <https://cusail.engineering.cornell.edu/app/fleet.html>.
  - [74] Stein T. First saildrone circumnavigates Antarctica, seeking carbon dioxide[EB/OL]. (2019)[2021-06-07]. <https://www.climate.gov/news-features/features/first-saildrone-circumnavigates-antarctica-seeking-carbon-dioxide>.
  - [75] Submaran[EB/OL]. (2017)[2021-06-07]. <http://www.navaldrones.com/Submaran.html>.
  - [76] Rathour S S. Design and Development of an Autonomous Robotic Platform for Detecting, Monitoring and Tracking of Oil Spill on the Sea Surface[J]. 2016.
  - [77] Klinck H, Fregosi S, Matsumoto H, et al. Mobile Autonomous Platforms for Passive-Acoustic Monitoring of High-frequency Cetaceans[M]//Friebe A, Haug F. Robotic Sailing 2015. Cham: Springer International Publishing, 2016: 29-37.
  - [78] ocean current | Distribution, Causes, & Types | Britannica[EB/OL]. [2022-04-17]. <https://www.britannica.com/science/ocean-current>.
  - [79] Kerwin J. A velocity prediction program for ocean racing yachts revised to February 1978[J]. H. Irving Pratt Ocean Race Handicapping Project, MIT Report, 1978(78-11).
  - [80] ORC VPP Documentation[M]. 2016.
  - [81] Ploé P. Surrogate-based optimization of hydrofoil shapes using RANS simulations[D]. 2018.

- [82] Polar diagram (sailing)[Z]/Wikipedia. 2022.
- [83] de Jong P, Katgert M, Keuning L. The development of a Velocity Prediction Program for traditional Dutch sailing vessels of the type Skûtsje[C]/20th HISWA Symposium. 2008.
- [84] Graf K, Bohm C. A new velocity prediction method for post-processing of towing tank test results[C]/17th Chesapeake Sailing Yacht Symposium. 2005.
- [85] ORC VPP - Designer's version[EB/OL]. (2020). <https://orc.org/index.asp?id=41>.
- [86] Briere Y. Iboat: An autonomous robot for long-term offshore operation[C]/MELECON 2008-The 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. IEEE, 2008: 323-329.
- [87] Rynne P F, von Ellenrieder K D. Development and preliminary experimental validation of a wind-and solar-powered autonomous surface vehicle[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2010, 35(4): 971-983.
- [88] Keuning J, Sonnenberg U B. Approximation of the hydrodynamic forces on a sailing yacht based on the'Delft Systematic Yacht Hull Series'[M]. Delft University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Marine ...., 1998.
- [89] Tretow C. Design of a free-rotating wing sail for an autonomous sailboat[M]. 2017.
- [90] Miller P, Hodapp P, Pinch R, et al. Correlation of Velocity Prediction Program for Small Autonomous Sailboats[M]/Robotic Sailing 2017. Springer, 2018: 19-30.
- [91] Martin D, Beck R F. Pcsail, a velocity prediction program for a home computer[C]. 2001.
- [92] Miller P, Judge C, Sewell D, et al. An Alternative Wing Sail Concept for Small Autonomous Sailing Craft[M]/Robotic Sailing 2017. Springer, 2018: 3-17.
- [93] Eggert F. Flight Dynamics and Stability of a Hydrofoiling International Moth with a Dynamic Velocity Prediction Program (DVPP)[D]. Technische Universität Berlin, 2018.
- [94] Clark N A. Validation of a sailing simulator using full scale experimental data[D]. University of Tasmania, 2014.
- [95] Alves J C, Cruz N A. Fast-an autonomous sailing platform for oceanographic missions[C]/OCEANS 2008. IEEE, 2008: 1-7.
- [96] Baker R, Kambourian L, Hajarian S, et al. Design and Development of a Self-Stabilizing, Autonomous Sailboat with Zero-Net Stored-Energy Use[M]/Friebe A, Haug F. Robotic Sailing 2015. Cham: Springer International Publishing, 2016: 39-57.
- [97] Rynne P, Ellenrieder K D von. Development and Preliminary Experimental Validation of a Wind- and Solar-Powered Autonomous Surface Vehicle[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2010, 35: 971-983.

- 
- [98] Briere Y. IBOAT: An autonomous robot for long-term offshore operation[C]//MELECON 2008 - The 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Ajaccio, France: IEEE, 2008: 323-329.
  - [99] Neal M, Sauzé C, Thomas B, et al. Technologies for autonomous sailing: wings and wind sensors[J]. Proceedings of the 2nd IRSC, Matosinhos, Portugal, July, 2009: 6-12.
  - [100] Sliwka J, Reilhac P H, Leloup R, et al. Autonomous robotic boat of ensieta[C]//2nd International Robotic Sailing Conference, Matosinhos, Portugal. 2009.
  - [101] ITTC. International Towing Tank Conference[J]. 2011.
  - [102] Du M, Kang M, Hou C, et al. Study of Long-term Route Planning for Autonomous Sailboat[C]//Proceedings of the International Robotic Sailing Conference. 2018.
  - [103] Guelfi G, Canepa E. New Development in 6-Dof Algorithms for Sailing Yacht Velocity Prediction Program and New Insight in Appendages Force Modelling[J]. 2013.
  - [104] Prince M, Claughton A. The SYRF Wide Light Project[C]//The 22nd Chesapeake Sailing Yacht Symposium. 2016: 135-150.
  - [105] Turnock S R, Holroyd N J, Date J C. Appendage design for the america's cup using CFD[C]. 2001.
  - [106] Harries S, Abt C, Hochkirch K. Hydrodynamic modeling of sailing yachts[C]//15th Chesapeake Sailing Yacht Symposium. 2001.
  - [107] Zanella M R. Improved Sailboat Design Process and Tools Using Systems Engineering Approach[D]. Virginia Tech, 2020.
  - [108] Graf K, Boehm C, Renzsch H. CFD-and VPP-Challenges in the Design of the New AC90 Americas Cup Yacht[C]//Proceedings 19th Chesapeake Sailing Yacht Symposium. 2009.
  - [109] de Elvira M R. Design of a generalized tool for the performance assessment under sail based on analytical, numerical and empirical results. a global sailing yacht meta-model[D]. 2015.
  - [110] Eliasson R, Larsson L, Orych M. Principles of yacht design[M]. A&C Black, 2014.
  - [111] Maskew B, DeBord F. Upwind Sail Performance Prediction for a VPP including " Flying Shape" Analysis[C]//19th Chesapeake Sailing Yacht Symposium. 2009.
  - [112] Sauzé C, Neal M. Design considerations for sailing robots performing long term autonomous oceanography[C]//International Robotic Sailing Conference. Centrobot, 2008: 21-29.
  - [113] Sponberg E W. The Design Ratios[J]. Sponberg Yacht Design Inc, 2011.
  - [114] Rynne P, Von Ellenrieder K. A wind and solar-powered autonomous surface vehicle for sea surface measurements[C]//OCEANS 2008. IEEE, 2008: 1-6.

- [115] Stelzer R, Proll T, John R I. Fuzzy Logic Control System for Autonomous Sailboats[C]//2007 IEEE International Fuzzy Systems Conference. London, UK: IEEE, 2007: 1-6.
- [116] Alves J C, Ramos T, Cruz N. A recongurable computing system for an autonomous sailboat[C]//Proceedings of the 1st International Robotic Sailing Conference. 2008.
- [117] Rynne P F. Design & performance of a wind and solar-powered autonomoussurface vehicle[M]. Florida Atlantic University, 2008.
- [118] Klinck H, Stelzer K, Jafarmadar K, et al. Aas endurance: An autonomous acoustic sailboat for marine mammal research[C]. 2009.
- [119] Koch M, Petersen W. Using ARM7 and µC/OS-II to Control an Autonomous Sailboat[M]//Robotic Sailing. Springer, 2011: 101-112.
- [120] Anthierens C, Pauly E, Jeay F. MARIUS: A sailbot for sea-sailing[M]//Robotic Sailing 2013. Springer, 2014: 3-12.
- [121] Cabrera-Gámez J, de Miguel A R, Domínguez-Brito A, et al. An embedded low-power control system for autonomous sailboats[M]//Robotic Sailing 2013. Springer, 2014: 67-79.
- [122] Cruz N A, Alves J C, Guedes T, et al. Integration of wind propulsion in an electric ASV[C]//World Robotic Sailing championship and International Robotic Sailing Conference. Springer, 2015: 15-27.
- [123] Fernandes P C, Marques M M, Lobo V. Barlavento-considerations about the design of an autonomous sailboat[C]//World Robotic Sailing championship and International Robotic Sailing Conference. Springer, 2016: 19-30.
- [124] Kang M, Xu J, Xu J, et al. Autonomous sailboat local route planning[C]//World Robotic Sailing championship and International Robotic Sailing Conference. Springer, 2016: 33-43.
- [125] Augenstein T, Singh A, Miller J, et al. Using a Controlled Sail and Tail to Steer an Autonomous Sailboat[M]//Alves J C, Cruz N A. Robotic Sailing 2016. Cham: Springer International Publishing, 2017: 91-103.
- [126] M\aaasala V, others. Autonomous sailing robot for marine research[D]. Aalto University, 2018.
- [127] A closer look: the 10 piece sail puzzle[EB/OL]. [2023-02-27]. <http://www.barcelonaworldrace.org/en/news/articles/a-closer-look-the-10-piece-sail-puzzle>.
- [128] 25 éves a Raffica - jubileumi Kékszalagra készülnek | HAJOZAS.HU[EB/OL]. [2023-02-27]. <https://hajozas.hu/magazin/vitorlazas/balatonfured-49kekszalag-raffica-jubileum-25eves-a-vitorlashajo/>.
- [129] ÇAKICI F, USTA O, DOĞRUL A, et al. Investigation of the Effects of Different Keel Geometries on a Sailing Yacht[C]//19th International Conference on Hydrodynamics in Ship Design & 4th International Symposium on Ship

- Maneuvering. 2012.
- [130] Clemens K. First Autonomous Circumnavigation of Antarctica[EB/OL]. (2019)[2021-06-07]. <https://www.designnews.com/batteryenergy-storage/first-autonomous-circumnavigation-antarctica>.
- [131] Alves J C, Cruz N A. Metasail—a tool for planning, supervision and analysis of robotic sailboat missions[M]//Robotic Sailing 2014. Springer, 2015: 57-64.
- [132] Eriksson R, Friebe A. Challenges for autonomous sailing robots[C]//14th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries, COMPIT15 Ulrichshusen. 2015: 11-13.
- [133] Holzgrafe J. Transverse stability problems of small autonomous sailing vessels[M]//Robotic Sailing 2013. Springer, 2014: 111-123.
- [134] Tranzatto M, Liniger A, Grammatico S, et al. The debut of Aeolus, the autonomous model sailboat of ETH Zurich[C]//OCEANS 2015-Genova. IEEE, 2015: 1-6.
- [135] Petres C, Romero-Ramirez M A, Plumet F, et al. Modeling and reactive navigation of an autonomous sailboat[C]//2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Francisco, CA: IEEE, 2011: 3571-3576.
- [136] Dhomé U. Further development and performance evaluation of the autonomous sailing boat Maribot Vane[R]. 2018.
- [137] IRC Rule, Notices & Policies[EB/OL]. [2023-03-27]. <https://ircrating.org/irc-rule/>.
- [138] Böhm C. A Velocity Prediction Procedure for Sailing Yachts with a hydrodynamic Model based on integrated fully coupled RANSE-Free-Surface Simulations[J]. 2014.
- [139] Sellgren U. Simulation-driven design: motives, means, and opportunities[D]. KTH, 1999.
- [140] Lasher W C, Sonnenmeier J R, Forsman D R, et al. Experimental force coefficients for a parametric series of spinnakers[C]//SNAME 16th Chesapeake Sailing Yacht Symposium. OnePetro, 2003.
- [141] Gormand M. Full Scale Test Case For Sailing Yacht Performance[J]. 2015.
- [142] Keuning J, Katgert M, Vermeulen K J. Keel-rudder interaction on a sailing yacht[C]//19th International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction, Amsterdam, The Netherlands. 2006.
- [143] Whicker L F, Fehlner L F. Free-stream characteristics of a family of low-aspect-ratio, all-movable control surfaces for application to ship design[R]. David Taylor Model Basin Washington DC, 1958.
- [144] Gerritsma J. Course keeping qualities and motions in waves of a sailing yacht[C]//TU Delft, Faculty of Marine Technology, Ship Hydromechanics Laboratory, Report No. 200-P, 3rd AIAA Symposium Aero, Hydronautics of

- Sailing. 1968.
- [145] Abbott I H, Von Doenhoff A E. Theory of wing sections: including a summary of airfoil data[M]. Courier Corporation, 2012.
- [146] Fossati F, Muggiasca S, Viola I M. An investigation of aerodynamic force modelling for IMS Rule using wind tunnel techniques[C]//Proc. 19th HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction, Amsterdam, The Netherlands, Nov. 2006: 13-14.
- [147] Jackson P. Modelling the aerodynamics of upwind sails[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1996, 63(1-3): 17-34.
- [148] Jackson P S. An improved upwind sail model for VPPs[J]. SNAME 15th CSYS, 2001.
- [149] Fujiwara T, Ueno M, Nimura T. Estimation of wind forces and moments acting on ships[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1998, 1998(183): 77-90.
- [150] Guelfi G, Canepa E. New Development in 6-Dof Algorithms for Sailing Yacht Velocity Prediction Program and New Insight in Appendages Force Modelling[J]. 2013.
- [151] Eliasson R, Larsson L, Orych M. Principles of yacht design[M]. A&C Black, 2014.
- [152] Gerritsma J. Course keeping qualities and motions in waves of a sailing yacht[C]//TU Delft, Faculty of Marine Technology, Ship Hydromechanics Laboratory, Report No. 200-P, 3rd AIAA Symposium Aero, Hydronautics of Sailing. 1968.
- [153] Deakin B. The development of stability standards for UK sailing vessels[J]. 1991.
- [154] Saoud H, Hua M D, Plumet F, et al. Optimal sail angle computation for an autonomous sailboat robot[C]//2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Osaka: IEEE, 2015: 807-813.
- [155] Wang Q, Kang M, Xu J, et al. Autonomous sailboat track following control[C]//World Robotic Sailing championship and International Robotic Sailing Conference. Springer, 2015: 125-136.
- [156] Biancolini M E, Cella U, Clarich A, et al. Multi-objective optimization of A-Class Catamaran foils adopting a geometric parameterization based on RBF mesh morphing[M]//Evolutionary and Deterministic Methods for Design Optimization and Control With Applications to Industrial and Societal Problems. Springer, 2019: 467-482.
- [157] Pelikan M, Goldberg D E, Cantú-Paz E, et al. BOA: The Bayesian optimization algorithm[C]//Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference GECCO-99: Vol. 1. Citeseer, 1999: 525-532.
- [158] Tran A, Sun J, Furlan J M, et al. pBO-2GP-3B: A batch parallel known/unknown constrained Bayesian optimization with feasibility classification and its

- applications in computational fluid dynamics[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, 347: 827-852.
- [159] Priem R. Upper trust bound feasibility criterion for mixed constrained Bayesian optimization with application to aircraft design[J]. Aerospace Science and Technology, 2020: 24.
- [160] Park S, Atwair M, Kim K, et al. Bayesian optimization of industrial-scale toluene diisocyanate liquid-phase jet reactor with 3-D computational fluid dynamics model[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2021, 98: 327-339.
- [161] Shahriari B, Swersky K, Wang Z, et al. Taking the Human Out of the Loop: A Review of Bayesian Optimization[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(1): 148-175.
- [162] Greenhill S, Rana S, Gupta S, et al. Bayesian Optimization for Adaptive Experimental Design: A Review[J]. IEEE Access, 2020, 8: 13937-13948.
- [163] Lam R, Poloczek M, Frazier P, et al. Advances in Bayesian Optimization with Applications in Aerospace Engineering[C]//2018 AIAA Non-Deterministic Approaches Conference. Kissimmee, Florida: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [164] Frazier P I. A Tutorial on Bayesian Optimization[J]. arXiv:1807.02811 [cs, math, stat], 2018.
- [165] Qin S, Sun C, Jin Y, et al. Bayesian Approaches to Surrogate-Assisted Evolutionary Multi-objective Optimization: A Comparative Study[C]//2019 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). Xiamen, China: IEEE, 2019: 2074-2080.
- [166] Snoek J, Larochelle H, Adams R P. Practical Bayesian Optimization of Machine Learning Algorithms[J].
- [167] Torrey L, Shavlik J. Transfer Learning[M]//Olivas E S, Guerrero J D M, Martinez-Sober M, et al. Handbook of Research on Machine Learning Applications and Trends. IGI Global, 2010: 242-264.
- [168] Zhuang F, Qi Z, Duan K, et al. A Comprehensive Survey on Transfer Learning[J]. Proceedings of the IEEE, 2021, 109(1): 43-76.
- [169] Pan S J, Yang Q. A Survey on Transfer Learning[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2010, 22(10): 1345-1359.
- [170] Niu S, Liu Y, Wang J, et al. A Decade Survey of Transfer Learning (2010–2020)[J]. IEEE Transactions on Artificial Intelligence, 2020, 1(2): 151-166.
- [171] Qingfu Zhang, Hui Li. MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, 11(6): 712-731.
- [172] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

- [173] McKay M D, Beckman R J, Conover W J. Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code[J]. *Technometrics*, 1979, 21(2): 239-245.
- [174] Jones D R. A taxonomy of global optimization methods based on response surfaces[J]. *Journal of global optimization*, 2001, 21(4): 345-383.
- [175] Jones D R, Schonlau M, Welch W J. Efficient Global Optimization of Expensive Black-Box Functions[J]. *Journal of Global Optimization*, 1998, 13(4): 455-492.
- [176] Dennis J, Torczon V. Managing approximation models in optimization[J]. *Multidisciplinary design optimization: State-of-the-art*, 1997, 5: 330-347.
- [177] An Y, Yu J, Zhang J. Autonomous sailboat design: A review from the performance perspective[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 238: 109753.
- [178] An Y, Yu J, Hu F, et al. Towards a general design evaluation tool: The development and validation of a VPP for autonomous sailing monohulls[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 120: 103053.
- [179] Inflated Wing Sails[EB/OL]. (2018)[2021-06-07].  
<http://inflatedwingsails.com/en/concept/>.
- [180] Hasler H G, Hasler H G, McLeod J. Practical Junk Rig: Design, Aerodynamics and Handling[M]. A&C Black, 2004.
- [181] Dryden R. The Transition Rig[EB/OL]. (2004)[2021-06-07].  
[http://www.transitionrig.com/the\\_concept.htm](http://www.transitionrig.com/the_concept.htm).
- [182] Ouchi K. R & D Strategy for the Technologies of Ship's Energy Saving and Zero-Emission[C]//paper published at the symposium superintended by Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. 2009: 155-158.
- [183] Oceanbird[EB/OL]. [2021-03-08]. <https://www.oceanbirdwallenius.com/>.
- [184] What are the advantages and disadvantages of a junk rig?[EB/OL]. [2021-03-08].  
[https://www.christinedemerchant.com/sail\\_junk\\_sail.html](https://www.christinedemerchant.com/sail_junk_sail.html).
- [185] Magnus effect - Wikipedia[EB/OL]. (2021)[2021-06-07].  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Magnus\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnus_effect).
- [186] Nuttall P, Kaitu'u J. The Magnus Effect and the Flettner Rotor: potential application for future Oceanic Shipping[J]. *The Journal of Pacific Studies*, 2016, 36(2): 161-182.
- [187] SkySails Yacht[EB/OL]. (2021)[2021-06-07]. <https://skysails-yacht.com/>.
- [188] Bigi N, Roncin K, Leroux J B, et al. 6 DOF Simulations for Stability Analysis of a Hydrofoil Towed by Kite[C]//5th high performance Yacht design conference. Auckland, 2015: 10.
- [189] Naaijen P, Koster V. Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite[C]//2nd International Conference on Marine Research and Transportation. 2007: 45-53.
- [190] Sclavounos P D. Flettner Rotor Sails for Ship Propulsion[EB/OL]. (2020)[2021-06-07]. <https://www.stormgeo.com/solutions/shipping/articles/flettner-rotor-sails-for-ship-propulsion>.

- sails-for-ship-propulsion/.
- [191] Hobbs M, Manganelli P. Measurement of accelerations and keel loads on canting keel race yachts[C]//RINA Modern Yacht Conference. 2007.
- [192] Claughton A, Oliver C. Design Considerations for Canting Keel Yachts.[C]//18th International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction, Amsterdam. 2004.
- [193] Borba Labi G, others. Velocity Prediction Program Development for Hydrofoil-Assisted Sailing Monohulls[D]. University of Genoa, 2019.
- [194] Official website of the Vendée Globe[EB/OL]. (2021)[2021-06-07]. <https://www.vendeeglobe.org/en>.
- [195] Aygor T, others. Analyses of Foil Configurations of IMOCA Open 60s with Towing Tank Test Results[J]. 2017.
- [196] Stability and foils on the new IMOCA, the operating principles[EB/OL]. (2017)[2021-06-07]. <https://www.pressmare.it/it/comunicazione/pressmare/2017-01-10/vela-foils-imoca-ocean-racer-vendee-globe-5479>.
- [197] IMOCA Globe Series. Safran Sailing Team - The foils user manual[EB/OL]. (2016-04-15)[2021-06-07]. <https://www.youtube.com/watch?v=vk-QJVmOw5c>.
- [198] Bergeson L, Clemmer G, York J, et al. Wind Propulsion for ships of the American merchant marine[J]. NTIS, SPRINGFIELD, VA, 1981, 276, 1981.
- [199] Bergeson L, Greenwald C K. Sail assist developments 1979–1985[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1985, 19(1-3): 45-114.
- [200] Tier L, Owen M, Sadler T. Practical aspects of canting keel design, construction and analysis[C]//2nd High Performance Yacht Design Conference, Auckland. 2006: 14-16.
- [201] Amateur Yacht Research Society. Sailing Hydrofoils[M]. Amateur Yacht Research Society, 1970.
- [202] Bourgeon J, Dyen S, Moyon D, et al. l'HYDROPTERE: A story of a dream[C]//21st HISWA International Symposium on Yacht Design and Yacht Construction. 2010: 13.
- [203] Sailrocket[EB/OL]. [2023-03-29]. <http://www.sailrocket.com/>.
- [204] Guillamet Pujadas M. Camino hacia la Vendée Globe 2020: la campaña del equipo One planet one ocean[D]. Universitat Politècnica de Catalunya, 2021.
- [205] Clark D J, Ellsworth W M, Meyer J R. The quest for speed at sea[C]. 2004.
- [206] Whitworth P R. Development of small-scale boats with advanced hydrodynamic configurations and instrumentation for open water testing[D]. WASHINGTON STATE UNIVERSITY, 2021.
- [207] Molland A F, Turnock S R. Marine rudders, hydrofoils and control surfaces: principles, data, design and applications[M]. Second edition. Oxford Cambridge, MA: Butterworth-Heinemann, 2022.
- [208] Song J, Zhao P, Liang L, et al. Force modeling of zero/low-velocity fin stabilizer

- and hydrofoil profile optimization[J]. Ocean Engineering, 2020, 213: 107635.
- [209] Souppez J B R G. Hydrofoil configurations for sailing superyachts: hydrodynamics, stability and performance[J]. Design & Construction of Super and Mega Yachts 2019, 2019.
- [210] Dewavrin J, Souppez J B R. Experimental Investigation into Modern Hydrofoils-Assisted Monohulls: How Hydrodynamically Efficient are they?[J]. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part B: International Journal of Small Craft Technology, 2018, 160(B2).
- [211] Obraastsov W. The calculation of the righting moment for a moving ship with an initial angle of heel[J]. University of Michigan, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, College of Engineering, Translated by: Michail Aleksandrov and Geoffrey Gardner, 1970.

## 附录 符号说明

$\alpha$	采样函数(值)
$action$	平台的控制量
$A_L$	船体水线以上侧投影面积
$AR$	相应构件的展弦比
$A_T$	船体水线以上横截面面积
$attitude$	平台的姿态
$Boa$	平台总宽
$Bwl$	水线宽
$C$	外界风力条件(集合)
$c_i$	特定外界风力条件
$c$	相应构件的平均弦长
$C_{A2B}$	参考系 A 到 B 的转换矩阵
$Cb$	船体方形系数
$C_D$	相应构件的阻力系数
$CE$	帆空气动力学中心
$CER$	舵水动力学中心
$CG$	重心
$C_L$	相应构件的升力系数
$CLR$	船体和龙骨的水动力学中心
$c_{r\ ex}$	扩展龙骨的根部弦长
$c_{tip}$	扩展龙骨的顶部弦长
$D$	相应构件的阻力
$d$	特定设计
$D_c$	裸船体型深
$e$	力(力矩)不平衡度
$f_{areo}$	平台的空气动力模型
$\hat{f}_{areo}$	平台的空气动力模型的估计值
$f_{hydro}$	平台的水动力模型

$\hat{f}_{hydro}$	平台的水动力模型的估计值
$F_{lat\_A}$	相应构件在船体坐标系中的横向分力
$F_{lon\_A}$	相应构件在船体坐标系中的纵向分力
$Fr$	傅汝德数
$F_{x\_A}$	相应构件在惯性坐标系中的 X 向分力
$F_{y\_A}$	相应构件在惯性坐标系中的 Y 向分力
$g$	重力加速度
$inv$	不确定性
$L$	相应构件上的升力
$l, SPAN$	相应构件展长
$lb$	下界
$L_{oa}$	总长
$L_{pp}$	垂线间长
$L_{wl}$	水线长
$m$	均值
$M\_A$	构件产生的恢复力矩
$P$	帕累托前线
$R_A$	DSYHS 模型中的阻力成分
$RC$	帆的底边弦长
$Re$	雷诺数
$S$	相应构件的纵向投影面积(第三章), 设计空间(第四章)
$t$	相应构件的平均厚度
$T$	计龙骨的总吃水
$Tc$	裸船体吃水
$TR$	锥度比
$ub$	上界
$V$	特定构件的进流速度
$VCG$	重心垂向坐标
$v$	特定构件的速度投影
$v_s$	帆船航速

$v_{s\_i}$  特定外界条件  $c_i$  下的航速

$v_t, TWS$	真风速
$v_w(h)$	在高度 $h$ 的真风速
$v_{10}$	10 米高处的真风速
$x_A$	构件到重心的纵向距离
$X_{best}$	总最优解
$x_{best}$	当前最优解
$z_A$	构件到重心的垂向距离
$\alpha$	构件的攻角
$\beta_t, TWA$	真风角
$\beta_s$	帆转角
$\beta_r$	舵转角
$\Delta$	总排水量
$\theta$	横倾角
$\lambda$	偏航角
$\nu$	流体运动粘度系数
$\Lambda$	后掠角
$\rho$	密度
$\varphi$	纵倾角

## 致 谢

在同届同学已经在学术道路上发展的风生水起，国科大已经向我的邮箱发送了《学习年限告知书》之际，我终于如期的完成了我的硕博连读学业。在研究和学习的过程中，由于研究领域较新且较为小众，在达到毕业所需的论文要求时我遇到了相当多的坎坷与困难，包括但不限于：相关性最强的外文专业期刊未被SCI收录，因此不能投稿；投稿期刊6个月才找到审稿人；审稿全程只有一名审稿人，且意见是以难以接受的理由拒稿等。在这个过程中我曾感到过困惑、焦虑和失望。然而，我也在这个过程中收获到了独立思考和解决实际问题的成就感。由于无人帆船的设计会显著的影响其性能，我至今仍骄傲的认为，我所选择的课题是一个有实际意义但一直被忽略的“真问题”。我也相信后续的研究者可以在我写作水平并不高的文章中寻找到一些有价值的见解。

在毕业之际，我要特别的感谢我的博士生导师俞建成研究员。无论是学业中还是生活上，俞老师都给了我足够的宽容，让我有较大的自主权来选择研究方向和进行研究。同时俞老师精深的学识和敏锐洞察力帮我确保了每项研究都在正确的方向上。俞老师严谨治学的态度和对科研工作的热情执着为我未来的工作和学习树立了榜样。

感谢我硕士阶段的导师刘健研究员，刘老师幽默的谈吐、平易近人的作风和组内轻松愉快的学术氛围使初入科研之路的我培养了对科研的兴趣和热爱。让我参与“探索4500”等重大工程项目极大的拓阔了我的视野，加深了我对海洋机器人的认识和理解。

感谢我的母亲王伟丽女士，在我漫长的求学生涯里，无论学业中还是生活上，她都不会武断的对我的事务进行干涉，而是从来都是默默支持我做出自己的决定。她的理解支持是我不断前行的动力。

感谢师兄张进副研究员，张师兄在文章创新和写作方面给与了我宝贵的指点，并在许多重要的选择上为我解惑。感谢同事胡峰，在学术上他是我多项工作的第二作者，给了我从选题立意到实验设计的宝贵意见，并完成了绝大部分的水动力算例。在生活上，作为亲密朋友，给与了我许多情感支持。

感谢室友葛志康，在同一寝室生活期间，彼此生病时的相互照顾、学术上的商业互吹和一起度过的游戏时光是紧张而焦虑的博士生活的中的一抹亮色。感谢罗业腾副研究员在软件技术和部分午餐方面的支持与帮助。感谢这些年错过的女孩们，正是你们的决绝使我有足够的精力在知识的海洋里遨游。

感谢王亚兴研究员、宋三明研究员，师兄徐高飞、王振宇副研究员、霍雨佳，师姐孙洁副研究员，同学康帅、郜天柱副研究员、尹猛、李帅龙，师弟陈阔在课题的研究过程中学术和情感方面的支持与陪伴，感谢南京天洑公司的刘志坚、张儒、张琪在参数化建模、优化方法和水动力方面的支持。感谢王雨、王庆全、杨

敏敏、王起慧对文章的细致阅读和修改建议。感谢黄建伟和刘婕为相关部分绘制了精美的插图。感谢陈相非在算力方面的协助。感谢学术委员会各位老师、盲审专家、匿名审稿人、答辩秘书李宏博对我的帮助。

感谢苏贊、万广喜、陈博、刘鼎、徐高鹏、周玮杰、李海星、黄婉莹等队友在历次比赛中的合作，这些比赛经历扩展了我的知识广度、丰富了我的工程经验、培养了我的自信。

感谢研究室秘书赵一霏，师兄刘世杰、赵文涛副研究员、同学金乾隆、任楷，师弟战伟聪、冯浩、刘凯、曲艺一路上的陪伴。非常感谢研究室部分师兄在职场技巧方面的言传身教。在我即将走向社会的阶段，这些宝贵的经验对我的职业发展和个人成长都将起到重要的作用。

无论命运在前方给我准备的是崎路还是坦途，我都已经做好了准备。希望自己能够永远保持初心，一直是那个被热情和好奇心驱动、勇于挑战的人。

安洋

2023年6月 沈阳

## 作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

### 作者简历:

2010 年 9 月——2014 年 6 月，在大连海洋大学船舶与海洋工程专业攻读学士学位。

2015 年 9 月——2023 年 6 月，在中国科学院沈阳自动化研究所攻读硕博连读博士学位。

### 获奖情况:

2023 年 5 月，获第一届“天洑杯”全国高校数据建模大赛三等奖。

2022 年 6 月，获第二届“率先杯”未来技术创新大赛复赛优胜。

2020 年 12 月，获珠海万山国际智能船艇公开赛“跨越险阻”项目赛冠军、综合总冠军。

2018 年 6 月，获第一届“率先杯”未来技术创新大赛复赛优胜。

2016 年 12 月，获辽宁省研究生大数据技术创新大赛中小学生校车路径规划赛题一等奖。

2016 年 7 月，获 RoboMasters2016 全国大学生机器人大赛赛区季军，全国 32 强。

### 已发表(或正式接受)的学术论文:

[1] **An Y**, Yu J, Zhang J. Autonomous sailboat design: A review from the performance perspective[J]. Ocean Engineering, 2021, 238: 109753. (对应本文第一、二章,中科院小类一区 Top, SCI 收录)

[2] **An Y**, Yu J, Hu F, et al. Towards a general design evaluation tool: The development and validation of a VPP for autonomous sailing monohulls[J]. Applied Ocean Research, 2022, 120: 103053. (对应本文第三章,中科院大类二区, SCI 收录)

[3] **An Y**, Hu F, Chen K, et al. Optimising General Configuration of Wing-Sailed Autonomous Sailing Monohulls Using Bayesian Optimisation and Knowledge Transfer[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(4): 703. (对应本文第四章,中科院小类二区, SCI 收录)

- [4] An Y, Xu G, Xu C, et al. Path planning for multipoint seabed survey mission using autonomous underwater vehicle[C]//OCEANS 2017-Anchorage. IEEE, 2017: 1-5.(国际会议, EI 收录)

待发表的学术论文:

- [1] An Y, Hu F, Yu J, Numerical Investigation of the Effectiveness of Hydrofoil Stabilizers on Autonomous Sailing Monohulls. (对应本文第五章)

参加的研究项目:

1. 新型水翼无人帆船 (深远海专项前沿科技探索项目)

作为项目学生负责人, 参与项目论证及申请, 负责样机研制(总体设计)、水动力建模与分析、水动力外形优化与水翼设计。

2. 极端海洋动态过程多尺度自主观测科考设施论证 (发改委大科学装置预研项目)

作为项目论证组成员, 参与项目论证及申请, 负责平台船体形式、平台总布置方案、平台极端环境下生存能力论证。

3. 深海热液探测 AUV 系统“探索 4500” (中国科学院战略先导科技专项)

作为成员, 负责半物理仿真平台中声呐模块的部分算法设计和调试, 负责面向海底的勘测任务的航次级别全局任务规划的算法设计。