doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2025.06.004

拖鱼水动力特性的仿真分析及优化研究

侯本然[1,2]，许丽萍[1,2]，田　雨[1,2]

（1. 国家海洋技术中心，天津　300112；2. 自然资源部海洋观测技术重点实验室，天津　300112）

摘　要：走航式多参数剖面测量系统（Moving Vessel Profiler，MVP）可以在船舶航行过程中实时、快速、大范围地获取海洋温盐剖面观测数据，掌握海洋温跃层、密度跃层和声速剖面等海洋水文、水声结构。拖鱼作为 MVP 核心组件，其水动力特性直接影响海洋温盐剖面结构的观测效率。本文基于计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）仿真，构建椭圆与 Myring 线型拖鱼主体的三维模型，系统对比了小攻角工况（1°~10°）下的水动力性能，并通过主体–尾翼耦合模型分析了两种构型的轴向曳力差异。针对拖鱼下降剖面测量场景，选定轴向流体阻力更小的 Myring 线型拖鱼作为研究对象。采用参数化扫描方法，系统研究了浮心与重心位置对拖鱼径向稳定性的影响，并设计了三种优化配置方案：单调浮心、同步调控重心与浮心、单调重心，对比分析了不同策略下拖鱼偏转角度变化。结果表明：在 0.05 m 调节范围内，单独调整重心可使拖鱼最大偏转角度降低 12.186%，该策略在显著提升径向稳定性的同时，避免了多参数协同调控的复杂性，具有良好的工程实用性。本文构建了拖鱼水动力特性优化设计的理论框架，提出的单参数重心调节策略为拖鱼水动力性能优化提供了理论基础，对海洋观测装备的结构优化与稳定性控制具有参考价值。

关键词：拖鱼；水动力特性；计算流体动力学；优化

中图分类号：P716　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1003-2029（2025）06-0036-10

MVP 是一种通过动态拖曳技术实现船舶航行状态下的海洋剖面数据采集的智能化观测装备，可搭载不同的传感器，同步获取物理、化学及生物参数的高时空分辨率数据，已成为海洋基础数据获取的核心技术手段[1-2]。凭借集成化与自动化优势，近年来 MVP 在海洋观测领域的应用呈显著增长趋势[3-4]。

MVP 技术起源于加拿大 Brooke 公司的早期研发[2]。加拿大 AML 公司生产的 MVP 采用自由落体式剖面测量原理，由智能绞车、拖曳体及控制计算机组成，已广泛应用于海洋科考与军事海洋环境保障[4-5]。我国早期依赖进口设备开展海洋调查，自 21 世纪初启动走航式温度电导率剖面仪的研制工作。2015 年，中国科学院海洋研究所联合上海劳雷仪器系统有限公司，启动了国内首套全自动拖曳式多参数测量系统 MVP-3400 的研发。该系统降低了海洋观测的成本，为无人化和智能化海洋观测提供了重要的技术支撑[1]。历经从国外技术引进到国内自主研发的发展，MVP 系统的应用价值持续凸显，而核心组成部分的性能提升是其适配更复杂海洋观测需求的关键。

MVP 系统主要由拖鱼、数据采集单元、绞车及液压系统、控制系统等部分组成。其中，拖鱼作为核心执行单元，承担传感器搭载与水下测量任务[5]，其模块化设计支持温盐深（Conductivity-Tempera-

收稿日期：2025-06-18

基金项目：自然资源部海洋观测技术重点实验室基金资助项目（2023klootB01）

作者简介：侯本然（1998—），女，硕士，助理工程师，主要从事海洋测量传感器性能仿真与数据处理研究。
E-mail：houbenran23@163.com

通信作者：许丽萍（1991—），女，硕士，工程师，主要从事海洋测量传感器结构设计优化技术研究。
E-mail：liping_xu1115@163.com

ture-Depth，CTD）测量仪、叶绿素 a 荧光计、pH 计等多种传感器的集成[2]，使 MVP 具备高度的灵活性和扩展性。作为水下作业设备，要求拖鱼具有良好的水动力性能及较强的环境适应性，能够高效、稳定地完成走航测量。因此，针对拖鱼水动力特性的研究与优化在 MVP 系统研制中具有重要意义。

当前，水动力特性研究多聚焦于水下航行器等设备[6-10]，而针对拖鱼水动力性能优化的研究相对薄弱。针对拖鱼外形设计，CAMMARATA A 等[11]通过参数分析明确了水平姿态保持的关键影响因素。PARK J 等[12]建立了拖曳船-拖缆-拖鱼多体动力学模型，揭示了半潜系统的运动特性。GO G 等[13]提出了一种基于 CFD 确定拖曳式水下航行器水动力导数的新方法。MUSCAT M 等[14]设计了一款用于监测海洋污染的拖鱼，并通过仿真分析了结构件的受力情况。现阶段，拖鱼水动力性能优化的专项研究尚显薄弱，其直接性与系统性方面的研究仍需进一步强化。

为此，本文基于拖鱼下降剖面测量的使用工况，通过仿真分析，对比了拖鱼椭圆线型主体、Myring 线型主体及各型主体耦合尾翼后的拖鱼整体水动力性能，利用 Myring 线型拖鱼模拟其受径向流载荷时的姿态，对重心、浮心的优化配置与拖鱼径向稳定性的关系开展仿真分析。本文的研究结果为拖鱼外形与结构布局设计提供了理论参考，有助于提升拖鱼下降速度和姿态稳定性。

1　研究基础

1.1　拖鱼模型

基于椭圆曲线设计椭球体头部、尾部，结合圆柱体平行中段的外形设计是当前水下拖曳体的主流设计之一。基于其在水下拖曳体设计中的广泛应用，本文在该线型的基础上，综合考虑拖鱼所集成的温盐深传感器的外形尺寸与安装结构，在探头首尾两端均进行椭圆修正，中间段为平行中体，首、尾部曲线方程分别为式(1)和式(2)。

$$y_s = \frac{D_0}{2L_E}\sqrt{L_E^2 - x^2} \tag{1}$$

$$y_w = \frac{D_0}{2L_R}\sqrt{L_R^2 - x^2} \tag{2}$$

式中，D_0 为横截面最大直径；L_E 为进流段长度；L_R 为去流段长度。

Myring 型拖曳体外形是一种典型的流线型回转体，由头部、中部和尾部三部分组成，三段的长度可变，具有阻力较小、稳定性较好等优点，这种外形已经应用到自主水下航行器（Autonomous Underwater Vehicle，AUV）的成品外形设计上，例如美国的远程环境监视单元（Remote Environmental Monitoring Units，REMUS）AUV[15-16]。参照相关文献资料[15-16]，本文将优化后的拖鱼模型的头部、尾部外形曲线方程分别设定如下。

$$r(x) = 0.5D_t\left[1 - \left(\frac{x-a}{a}\right)^2\right]^{\frac{1}{n}} \tag{3}$$

$$r(x) = 0.5D_t - \left[\frac{3D_t}{2(L_t-a-b)^2} - \frac{\tan\theta}{(L_t-a-b)}\right](x-a-b)^2 + \left[\frac{D_t}{(L_t-a-b)^3} - \frac{\tan\theta}{(L_t-a-b)^2}\right](x-a-b)^3 \tag{4}$$

式中，a、b 分别为头部、中部的长度；D_t 为中部等半径圆柱段的直径；L_t 为拖曳体全长；n 为头部指数参数；x 为轴向位置；$r(x)$为 x 取不同值时的半径值；θ 为尾部包角的一半。

本文将具有椭圆线型主体的拖鱼作为对比模型，将具有 Myring 线型主体的拖鱼作为优化模型，通过两种模型的对比仿真，分析不同线型的水动力特性。

1.2　仿真原理

拖鱼作为 MVP 的核心组成部分，其下落阶段的水动力特性直接影响着海洋剖面结构的观测效率。因此，本文通过构建三维流固耦合模型，仿真分析拖鱼下落过程阻力分布与运动姿态的变化规律。

拖鱼在下落过程中，受到重力、浮力、曳力和升力的共同作用。在来流方向上拖鱼受到的曳力用 F_D 表示，垂直于来流方向上的升力用 F_L 表示。

$$F_D = \frac{1}{2}\rho v^2 S C_D \tag{5}$$

$$F_L = \frac{1}{2}\rho v^2 S C_L \tag{6}$$

式中，ρ 为水体密度；v 为拖鱼相对水体的速度；S 为特征面积；C_L 为拖鱼的升力系数；C_D 为拖

鱼的曳力系数，与形状、表面粗糙度、雷诺数等因素相关。

从阻力构成来看，阻力主要由摩擦阻力和压差阻力组成。本文在流体阻力计算时只考虑压差阻力与摩擦阻力。

拖鱼受到的浮力 F_f 大小计算如下。

$$F_f = \rho g V_t \tag{7}$$

式中，ρ 为水体密度；g 为重力加速度；V_t 为拖鱼排水体积。

当拖鱼所受重力、阻力和浮力达到均衡时，运动将达到均匀状态，之后拖鱼以极限速度匀速下降。综合拖鱼受力情况，得到拖鱼下落时的基本运动方程组如下。

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} = v \\ M\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = Mg - F_f - F_D \\ F_f = \rho g V_t \\ F_D = \dfrac{1}{2}\rho v^2 S C_D \end{cases} \tag{8}$$

式中，z 为拖鱼下落距离；t 为下落时间；M 为拖鱼质量。

2 仿真分析

在拖鱼下放过程中，拖鱼由绞车控制缆绳下放，缆绳连接拖鱼吊杆，吊杆装配于拖鱼主体两侧，连线过拖鱼重心，使拖鱼在 360°内可以绕重心以吊杆连线为轴旋转。在拖鱼下放、剖面测量、回收的过程中，会受到水流作用而产生流体阻力，降低拖鱼的下落速度，同时，径向流的作用会对拖鱼的空间姿态产生扰动，致使拖鱼发生偏转，进而影响测量作业的稳定性。本文通过仿真拖鱼受到的流体阻力来分析拖鱼的水动力特性，通过重心与浮心的优化配置，计算拖鱼在径向流作用下的偏转角度，从而为提升拖鱼姿态稳定性提供理论基础。

2.1 拖鱼主体水动力特性

在下降剖面测量时，拖鱼受到的阻力主要来自来流方向上的曳力和垂直于来流方向的升力，拖鱼的主体线型影响着曳力、升力系数。因此，本节通过流固耦合仿真对比了拖鱼的两种线型主体在小攻角下受到的流体阻力情况，进而验证优化模型在水动力性能方面的改进效果。

2.1.1 仿真设置

流体域大小设置为 20 m × 2.5 m × 5 m，水流攻角在 1°~10°范围内变化，间隔为 1°，流速大小为 1 m/s，流体密度为 1 024 kg/m³。拖鱼在流体域中没有位移。湍流模型设置为 k-ε 湍流，仿真环境设置如图1 所示。

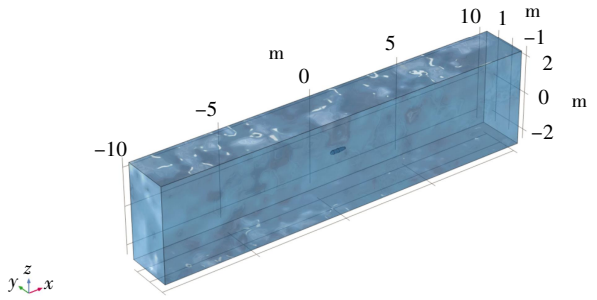
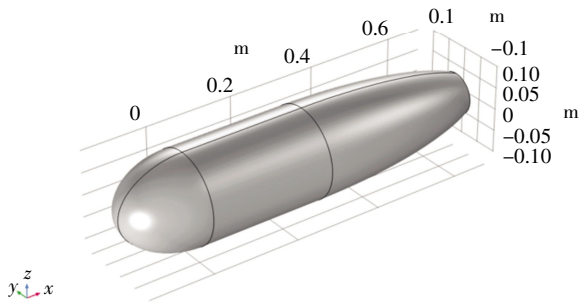
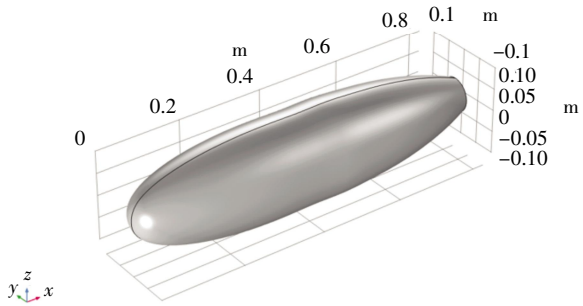


图 1 仿真环境设置

根据椭圆线型、Myring 线型方程，绘制拖鱼主体几何模型如图 2 所示，图 2(a)和图 2(b)分别为拖鱼椭圆线型和 Myring 线型主体模型，几何参数如表 1 所示。



(a) 拖鱼椭圆线型



(b) 拖鱼 Myring 线型

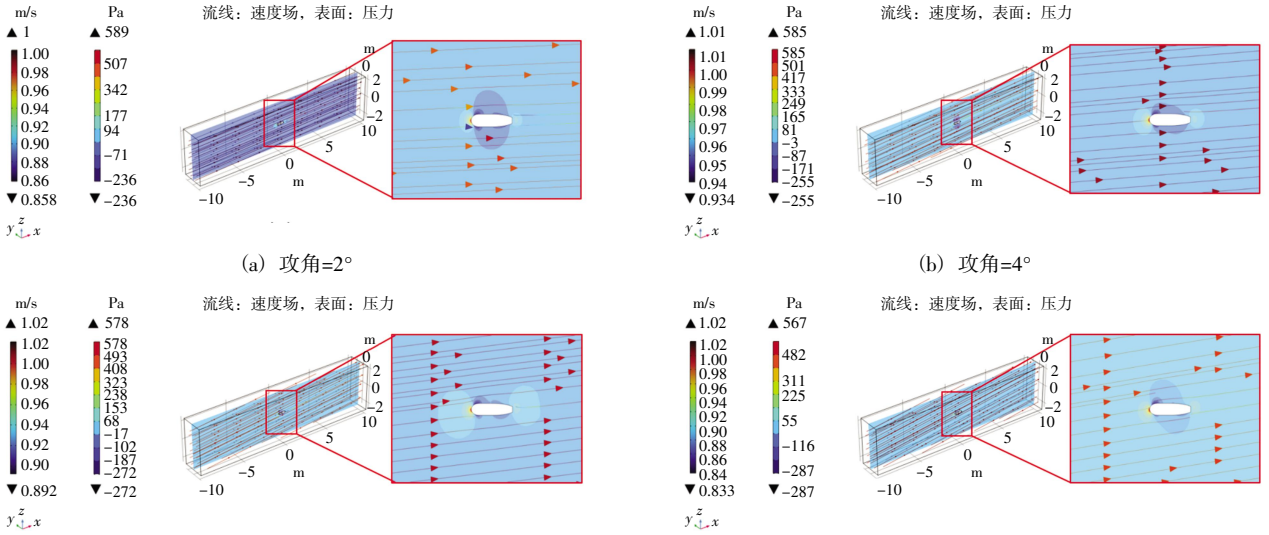
图 2 拖鱼主体模型

表 1 主体模型几何参数

几何参数	椭圆主体	Myring 主体
流线型主体长度/m	0.831	0.828
轴向投影面积/m²	0.035 496	0.032 362

2.1.2　仿真结果与数据分析

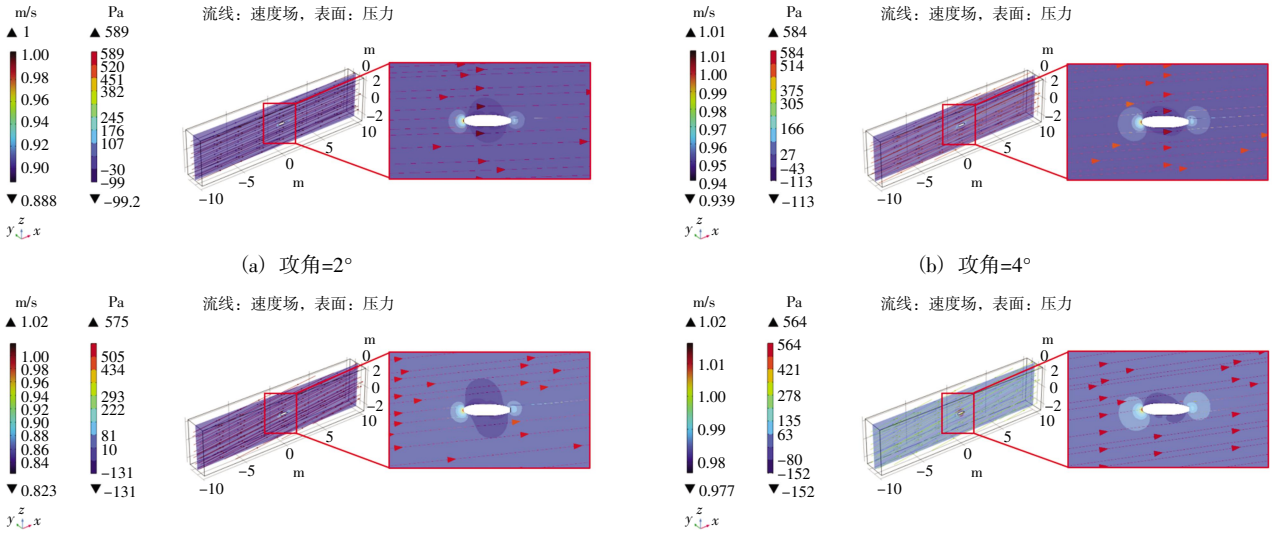
导入椭圆线型主体、Myring 线型主体的几何模型至流体域中心，在不同流体攻角下，计算拖鱼主体受到的曳力、升力。计算得到的流体域速度、压力分布如图 3 和图 4 所示。两型拖鱼主体受到的流体阻力如表 2 和表 3 所示。



(a) 攻角=2°　　(b) 攻角=4°

(c) 攻角=6°　　(d) 攻角=8°

图 3　椭圆线型主体在不同攻角下速度、压力分布



(a) 攻角=2°　　(b) 攻角=4°

(c) 攻角=6°　　(d) 攻角=8°

图 4　Myring 线型主体在不同攻角下速度、压力分布

表 2　椭圆线型主体受力

攻角/(°)	迎流面积/m²	曳力/N	升力/N
1	0.038 081	2.973	0.599
2	0.040 655	2.997	1.186
3	0.043 216	3.038	1.766
4	0.045 764	3.094	2.345
5	0.048 298	3.166	2.928
6	0.050 818	3.255	3.519
7	0.053 322	3.360	4.118
8	0.055 809	3.481	4.725
9	0.058 280	3.618	5.338
10	0.060 733	3.773	5.957

表 3　Myring 线型主体受力

攻角/(°)	迎流面积/m²	曳力/N	升力/N
1	0.034 801	2.304	0.588
2	0.037 229	2.326	1.166
3	0.039 646	2.363	1.731
4	0.042 051	2.414	2.288
5	0.044 443	2.480	2.841
6	0.046 821	2.561	3.391
7	0.049 186	2.656	3.941
8	0.051 535	2.766	4.491
9	0.053 868	2.892	5.043
10	0.056 185	3.034	5.599

如图 5 所示，在 1°~10°的攻角范围内，随着攻角的增大，两种线型拖鱼主体受到的曳力、升力均增大，且升力增大速率大于曳力，这一结果也与文献[9]中的论述相符合。对比两种线型拖鱼主体受力情况，Myring 线型主体在小攻角下受到的曳力、升力均小于椭圆线型主体，这表示在小攻角作用下，Myring 线型较椭圆线型具有低流阻、稳定性更好的特性。

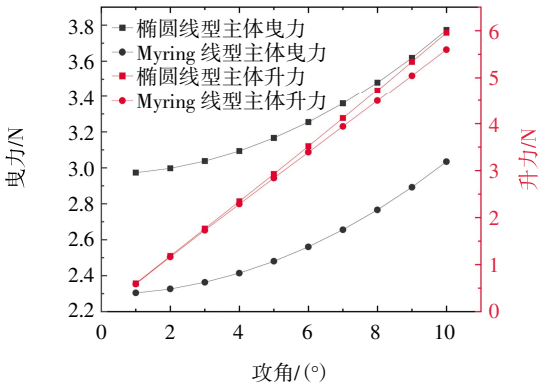


图 5 两种线型拖鱼主体小攻角下的曳力、升力对比

2.2 拖鱼整体水动力特性

2.2.1 仿真设置

为提升拖鱼的姿态稳定性，在其尾部增加尾翼设计[17-20]。但拖鱼尾翼的增设会改变拖鱼周围流场及曳力[21]，进而影响拖鱼的下放速度与测量效率。因此，本节通过仿真分析了两种线型拖鱼主体在耦合尾翼后受到的轴向流体阻力情况。

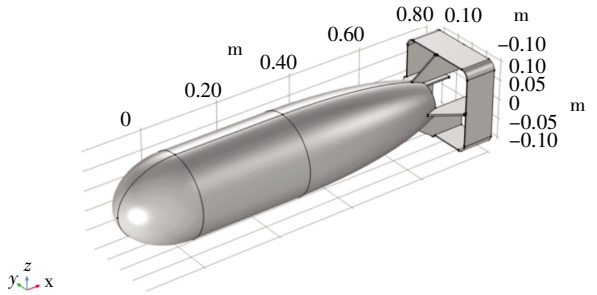
实际应用中的拖鱼外形包括拖鱼主体、尾翼、吊杆等。在三维耦合物理场仿真中，尺寸过小的零部件、过于细化的模型细节都会增加仿真时间成本，降低仿真程序的收敛性。因此，在导入拖鱼模型时，需要对其进行简化，以达到更好的收敛效果，缩短计算时间。本文忽略了拖鱼模型上的吊杆、螺钉、螺母等细节部分，只保留简化后的拖鱼流线型主体和尾翼。

耦合尾翼后的两种拖鱼整体模型参数及外形如表 4 与图 6 所示，浮心–重心距 D 与尾翼弦长中点–重心距 L 的位置关系如图 7 所示。

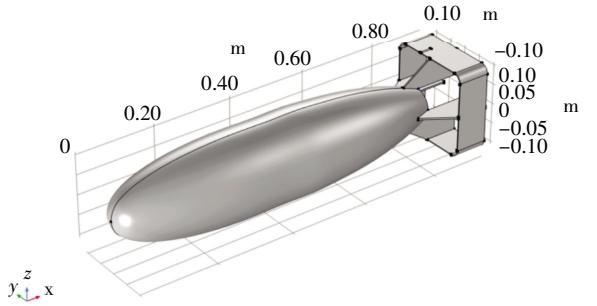
流体域大小设置为 20 m × 2.5 m × 5 m，水流方向沿拖鱼轴向，流速大小为 1 m/s，流体密度为 1 024 kg/m^3。拖鱼在流体域中没有位移。湍流模型设置为 k-ε 湍流，仿真环境设置与前文相同。

表 4 两种拖鱼模型的几何参数

几何参数	椭圆线型	Myring 线型
总长度/m	0.951	0.941
流线型主体长度/m	0.831	0.828
尾翼弦长/m	0.080	0.080
尾翼展宽/m	0.214	0.214
质量/kg	58.900	57.400
重心距顶点距离/m	0.328	0.375
浮心距顶点距离/m	0.413	0.415
浮心–重心距 D/m	0.085	0.040
尾翼弦长中点–重心距 L/m	0.583	0.526



(a) 含尾翼的椭圆线型



(b) 含尾翼的 Myring 线型

图 6 含尾翼的两种线型主体拖鱼的整体模型

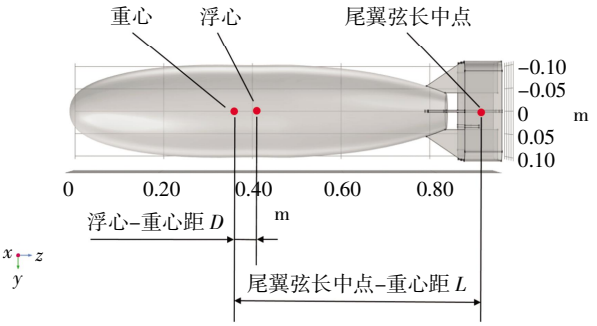
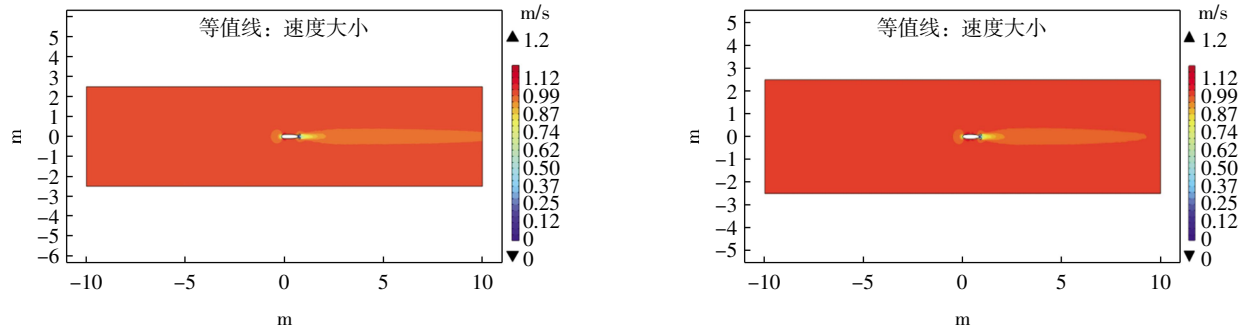


图 7 D 与 L 位置关系示意

2.2.2 仿真结果与数据分析

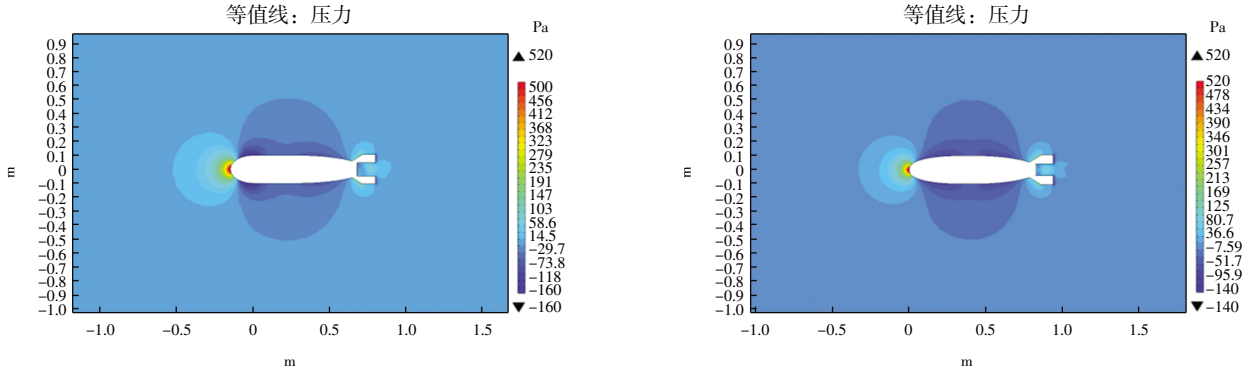
导入几何模型到相同的流体域环境中，得到流体域中的速度、压力分布如图 8 和图 9 所示。

由图 8 可知，在拖鱼主体尾部增加尾翼，两种拖鱼的尾翼后方都存在较长的低流速尾迹区域。从



(a) 椭圆线型　　(b) Myring 线型

图 8　两种线型主体拖鱼周围的速度场分布



(a) 椭圆线型　　(b) Myring 线型

图 9　两种线型主体拖鱼周围的压力场分布

图 9 可以看出，两种拖鱼因其对称形态，在拖鱼两侧产生了对称的低压区域，高压区集中于拖鱼头部和尾部。这表明尾翼的增设虽有助于增加拖鱼的径向稳定性，但尾翼增大了拖鱼的迎流面积，拖鱼整体受到的曳力会增大，牺牲了一定的下落速度，这一结果也符合文献[17]和[18]中的论述，因此需要对比两种拖鱼整体的轴向曳力情况。由表 5 中的计算结果可知，在增加了相同尾翼的情况下，Myring 线型主体拖鱼的曳力仍然小于椭圆线型主体拖鱼，这表明在拖鱼下降剖面测量的工况下，Myring 线型主体拖鱼相较椭圆线型主体拖鱼依旧表现出更好的水动力性能。

表 5　两种拖鱼轴向流体阻力对比

拖鱼模型	迎流面积/m²	曳力/N	曳力系数
椭圆线型	0.038 165	4.154	0.212 584
Myring 线型	0.035 456	3.384	0.186 411

2.3　重心与浮心的优化配置

拖鱼在下降剖面的测量中，在下落过程中不仅会受到轴向上的重力、浮力及轴向流体阻力，还会在径向受到流体环境中的水流冲击，使其产生姿态的偏转。下降过程中，拖鱼的姿态由其受力平衡情况决定，浮心–重心距 D、尾翼弦长中点–重心距 L 是影响拖鱼力矩分布的重要因素。在拖鱼生产加工过程中，可以通过调整拖鱼内部结构布局、增加浮体材料等方式，优化拖鱼整体的重心、浮心配置，进而改变浮心–重心距 D、尾翼弦长中点–重心距 L。

因此，根据前文的对比结果，本节选取水动力性能更好的 Myring 线型拖鱼整体开展对比仿真，对其重心、浮心位置进行参数化扫描，以此改变浮心–重心距 D、尾翼弦长中点–重心距 L 这两个关键力臂，对比拖鱼在相同径向流作用下的偏转角度，进而为提升拖鱼径向稳定性提供参考。

2.3.1　仿真设置

流体域大小设置为 4 m × 3 m × 4 m，拖鱼模型放置于流体域中心，在模型重心、浮心处施加重力、浮力载荷，在拖鱼模型表面施加轴向流体阻力，使模型在轴向上受力平衡，以模拟其匀速下落时的工况，初始参数同表 4 所示。在径向施加流体载荷，模拟拖鱼下落时受到恒定径向流的冲击，流

速为 1 m/s，流体域设置如图 10 所示。

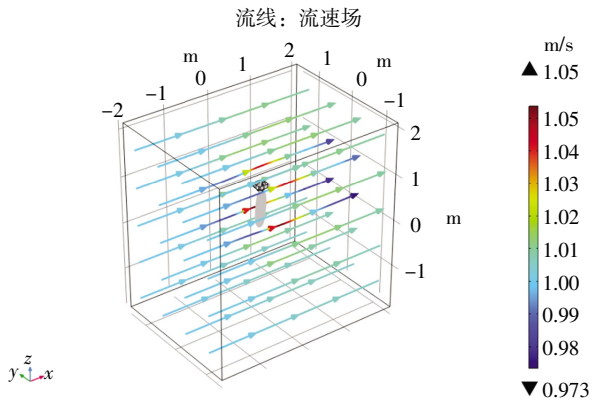


图 10　径向流仿真流体域设置

2.3.2　仿真结果与数据分析

（1）浮心–重心距 D 对拖鱼偏转角度的影响

仅改变拖鱼浮心位置，使其以 0.005 m 为间隔在 0.39~0.44 m 的轴向高度上变化，即保持尾翼弦长中点–重心距 L 不变，使浮心–重心距 D 单调递增，分析浮心–重心距 D 对拖鱼偏转角度的影响，计算结果如表 6 所示。结果显示，在工程操作上浮心可调整的范围内，随着浮心–重心距 D 的增大，拖鱼偏转角度逐渐减小，最大降幅可达 4.688%。当拖鱼以重心为旋转中心，绕 y 轴旋转时，浮心–重心距 D 的增大有助于使浮力产生更大的复原力矩，降低拖鱼的偏转角度，提升拖鱼匀速下落时的径向稳定性。

表 6　浮心–重心距 D 与拖鱼偏转角度

重心高度/m	浮心高度/m	尾翼弦长中点高度/m	浮心–重心距 D/m	尾翼弦长中点–重心距 L/m	偏转角度/(°)
0.375	0.390	0.901	0.015	0.526	5.439
0.375	0.395	0.901	0.020	0.526	5.411
0.375	0.400	0.901	0.025	0.526	5.384
0.375	0.405	0.901	0.030	0.526	5.358
0.375	0.410	0.901	0.035	0.526	5.332
0.375	0.415	0.901	0.040	0.526	5.307
0.375	0.420	0.901	0.045	0.526	5.282
0.375	0.425	0.901	0.050	0.526	5.257
0.375	0.430	0.901	0.055	0.526	5.232
0.375	0.435	0.901	0.060	0.526	5.208
0.375	0.440	0.901	0.065	0.526	5.184

（2）尾翼弦长中点–重心距 L 对拖鱼偏转角度的影响

改变轴向上的重心高度，使其以 0.005 m 为间隔在 0.35~0.40 m 范围内变化，同步改变浮心位置，使浮心–重心距 D 保持不变，使尾翼弦长中点–重心距 L 单调递减，分析尾翼弦长中点–重心距 L 对拖鱼偏转角度的影响，计算结果如表 7 所示。结果显示，在重心可调范围内，随着尾翼弦长中点–重心距 L 的减小，拖鱼偏转角度逐渐减小，最大降幅可达 16.344%。当拖鱼以重心为旋转中心，绕 y 轴旋转时，尾翼弦长中点–重心距 L 的减小也同样有助于减小拖鱼的偏转角度，且对于拖鱼径向稳定性提高的效率明显高于单独改变浮心位置。

表 7　尾翼弦长中点–重心距 L 与拖鱼偏转角度

重心高度/m	浮心高度/m	尾翼弦长中点高度/m	浮心–重心距 D/m	尾翼弦长中点–重心距 L/m	偏转角度/(°)
0.350	0.390	0.901	0.040	0.551	5.727
0.355	0.395	0.901	0.040	0.546	5.648
0.360	0.400	0.901	0.040	0.541	5.568
0.365	0.405	0.901	0.040	0.536	5.484
0.370	0.410	0.901	0.040	0.531	5.398
0.375	0.415	0.901	0.040	0.526	5.307
0.380	0.420	0.901	0.040	0.521	5.212
0.385	0.425	0.901	0.040	0.516	5.114
0.390	0.430	0.901	0.040	0.511	5.012
0.395	0.435	0.901	0.040	0.506	4.903
0.400	0.440	0.901	0.040	0.501	4.791

（3）浮心–重心距 D、尾翼弦长中点–重心距 L 对拖鱼偏转角度的综合影响

在拖鱼的生产制造与参数优化过程中，相较于浮心位置的调整，通过结构配重或质量分布优化等工程手段改变重心位置更具可操作性与经济性。使拖鱼轴向上的重心高度以 0.005 m 为间隔在 0.35~0.40 m 范围内变化，保持浮心位置不变，即浮心–重心距 D、尾翼弦长中点–重心距 L 同时单调递减，分析浮心–重心距 D、尾翼弦长中点–重心距 L 同步变化时对拖鱼偏转角度的影响，计算结果如表 8 所示。在重心可调范围内，随着浮心–重心距 D、尾翼弦长中点–重心距 L 的同步减小，拖鱼偏转角度逐渐减小，最大降幅可达 12.186%。

总结三种重心与浮心的优化配置方式结果如图 11 所示，在保持其他条件恒定的前提下，单独增大浮心–重心距 D、单独减小尾翼弦长中点–重心距 L、同步减小浮心–重心距 D 与尾翼弦长中点–重心

表 8　浮心–重心距 D、尾翼弦长中点–重心距 L 与拖鱼偏转角度

重心高度/m	浮心高度/m	尾翼弦长中点高度/m	浮心–重心距 D/m	尾翼弦长中点–重心距 L/m	偏转角度/(°)
0.350	0.415	0.901	0.065	0.551	5.605
0.355	0.415	0.901	0.060	0.546	5.551
0.360	0.415	0.901	0.055	0.541	5.494
0.365	0.415	0.901	0.050	0.536	5.435
0.370	0.415	0.901	0.045	0.531	5.372
0.375	0.415	0.901	0.040	0.526	5.307
0.380	0.415	0.901	0.035	0.521	5.238
0.385	0.415	0.901	0.030	0.516	5.165
0.390	0.415	0.901	0.025	0.511	5.089
0.395	0.415	0.901	0.020	0.506	5.008
0.400	0.415	0.901	0.015	0.501	4.922

距 L，均能够使拖鱼在径向流作用下的偏转角度呈现单调递减趋势，从而提升拖鱼的姿态稳定性。

针对拖鱼重心与浮心的优化配置问题，本节对三种典型配置方式进行了系统性对比分析。第一种优化策略为单一调节拖鱼浮心，通过在 0.05 m 的可调范围内增加浮心与重心的间距，仿真结果表明拖鱼最大偏转角度可降低 4.688%。第二种配置方案采用重心与浮心协同调节机制，在保持浮心–重心距 D 恒定的前提下，将尾翼弦长中点至重心的距离在 0.05 m 范围内进行动态调整，该方法可实现拖鱼偏转角度最大降幅达 16.344%。然而，该方案涉及重心与浮心的同步调控，对操作精度和系统协调性

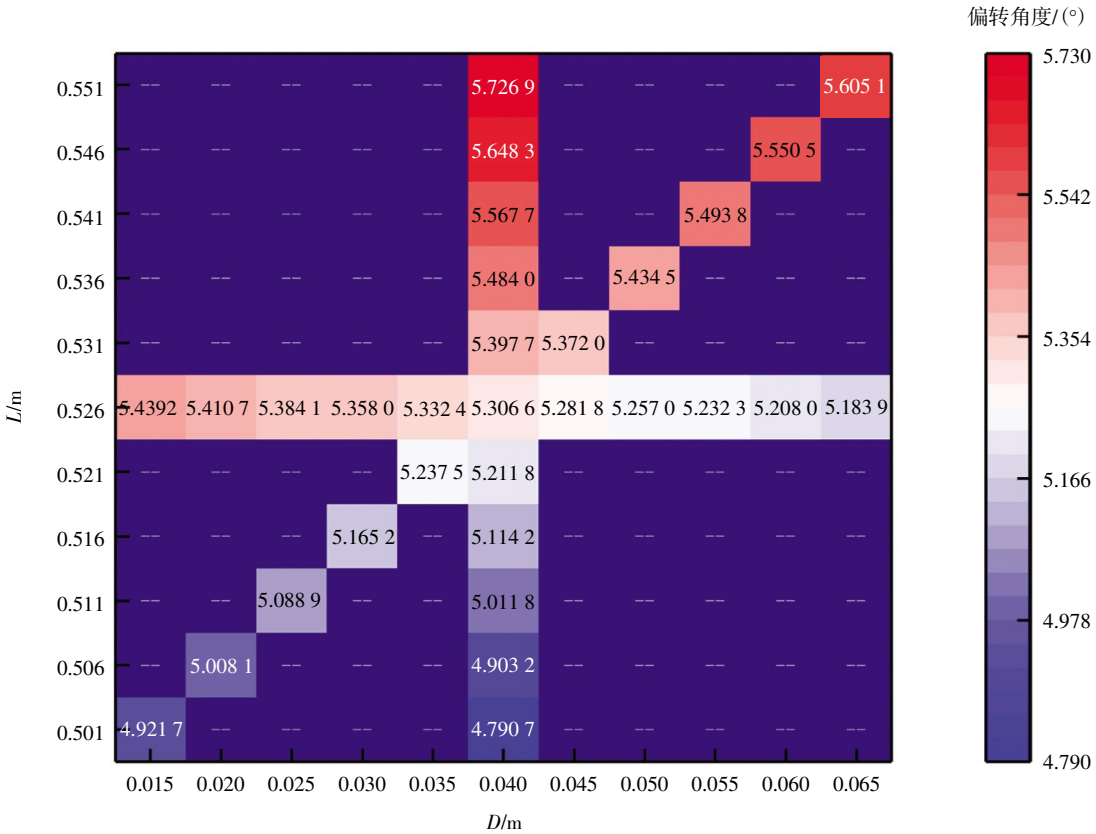


图 11　D、L 与拖鱼偏转角度

要求较高，实施过程中存在较大技术难度。第三种优化策略则专注于拖鱼重心的独立调节，通过将浮心–重心距 D、尾翼弦长中点–重心距 L 同步缩小 0.05 m，成功实现拖鱼偏转角度最大下降 12.186%。相较于前两种配置方式，此策略在显著提升拖鱼径向稳定性的同时，具有操作简便、实施成本低等显著优势，为工程实践中拖鱼姿态控制提供了更为高效的技术解决方案。

3　结　论

针对拖鱼在剖面测量作业中面临的复杂水动力环境，本文基于 CFD 数值仿真技术，构建三维流场模型，系统开展了椭圆线型与 Myring 线型拖鱼的水动力特性对比分析，并深入探究重心、浮心参数对拖鱼径向稳定性的影响机制，提出兼顾操作便

捷性与高效稳定性提升的重心与浮心的优化配置方案。

研究采用雷诺时均 Navier-Stokes（Reynolds Average Navier-Stokes，RANS）方程结合 k-ε 湍流模型，对 1°~10°小攻角工况下两种线型拖鱼的水动力性能进行定量分析。结果表明，Myring 线型拖鱼主体受到的流体阻力低于椭圆线型拖鱼，表现出良好的流阻特性。进一步构建主体–尾翼耦合结构的流固耦合分析模型，对比两种构型在轴向流工况下的轴向流体阻力特性，发现耦合尾翼的 Myring 线型拖鱼轴向流体阻力仍低于椭圆线型拖鱼，证明其在复杂流场中水动力性能更为优越。

在拖鱼动力学优化研究中，通过参数化建模与仿真分析，系统揭示了浮心–重心距 D 与尾翼弦长中点–重心距 L 对拖鱼姿态稳定性的影响规律。研究表明，单独增大 D 值或减小 L 值，均可有效降低拖鱼在径向流作用下的最大偏转角度。对比发现，在 0.05 m 的工程可行调节范围内单独调整重心位置、协同优化 D 与 L 参数，可实现拖鱼偏转角度最大降低12.186%。该优化策略兼具了操作简便性与拖鱼径向稳定性提升的高效性，为拖鱼结构设计中的浮心与重心的优化配置提供了重要的实践依据，为后续的拖鱼实体制造提供了重要的设计参考。

本文从几何构型优化与动力学参数调控双维度，系统解析了拖鱼水动力性能的提升机制，建立的理论分析框架与优化策略，为拖鱼的工程设计、流阻优化及姿态稳定性控制提供了理论支撑，为拖鱼的实体制造提供了技术支撑。未来，依托本文制造的拖鱼实体计划开展湖海测试，以期对研究结论做进一步验证。

参考文献：

[1] 任强，于非，魏传杰，等. 走航式多参数剖面测量系统的研制与应用[J]. 海洋测绘，2022，42(2)：33–36.

[2] 李冬，张永合，刘雷. 走航式多参数剖面测量系统（MVP）技术研究[J]. 数字技术与应用，2017，7：114–116.

[3] 李红志，闫晨阳，贾文娟. 海洋温盐深传感器技术自主创新与产业发展的几点思考[J]. 水下无人系统学报，2021，29(3)：249–256.

[4] 贾文娟，李红志，闫晨阳. 拖曳式海洋多参数观测系统与传感器[J]. 气象水文海洋仪器，2020，37(4)：92–96.

[5] 柴永平，占祥生. MVP 在综合调测中对多波束声速改正的应用[J]. 海洋技术学报，2019，38(6)：30–34.

[6] NYLUND A T，HASSELLÖV I，TENGBERG A，et al. Hydrographical implications of ship-induced turbulence in stratified waters, studied through field observations and CFD modelling[J]. Frontiers in Marine Science，2023，10：1273616.

[7] 刘启帮. 水下高速拖体流体动力性能研究[D]. 北京：中国舰船研究院，2016.

[8] 黄明龙. 自治水下航行器运动稳定性研究[D]. 天津：天津大学，2014.

[9] 赵远辉. 深海滑翔机水动力外形设计方法[D]. 武汉：华中科技大学，2016.

[10] LIU Y，MA J，MA N，et al. Experimental and numerical study on hydrodynamic performance of an underwater glider[J]. Mathematical Problems in Engineering，2018，2018：1–13.

[11] CAMMARATA A，SINATRA R. Parametric study for the steady-state equilibrium of a towfish[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems，2016，81(2)：231–240.

[12] PARK J，KIM N. Dynamics modeling of a semi-submersible autonomous underwater vehicle with a towfish towed by a cable[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering，2015，7(2)：409–425.

[13] GO G，AHN H T. Hydrodynamic derivative determination based on CFD and motion simulation for a tow-fish[J]. Applied Ocean Research，2019，82：191–209.

[14] MUSCAT M，CAMMARATA A，MADDIO P D，et al. Design and development of a towfish to monitor marine pollution[J]. Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration，2018，3(1)：1–12.

[15] 刘显龙. 水下拖曳体外形设计及其水动力性能分析[D]. 大连：大连理工大学，2010.

[16] MYRING D F. A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow[J]. Aeronautical Quarterly，1976，27(3)：186–194.

[17] 徐金随，程浩，相冰，等. XBT 探头外形数值模拟及实验研究[J]. 海洋技术学报，2017，36(2)：60–64.

[18] 陈文义，张瑞，刘宁，等. 投弃式海流剖面仪探头流场数值模拟[J]. 科技导报，2010，28(20)：62–65.

[19] 杨显原. 尾诱导型水下拖曳体研发及其水动力与控制特性研究[D]. 广州：华南理工大学，2022.

[20] 黄杰. 一种水下拖曳系统设计及运动仿真[D]. 成都：西南交通大学，2023.

[21] 王兵振，周茜子，刘政，等. 波浪滑翔机椭圆形后缘水翼动力特性研究[J]. 海洋技术学报，2021，40(3)：67–74.

Simulation Analysis and Optimization of Hydrodynamic Characteristics of Tow-Fish

HOU Benran[1,2], XU Liping[1,2], TIAN Yu[1,2]

(1. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China; 2. Key Laboratory of Ocean Observation Technology, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300112, China)

Abstract: The Moving Vessel Profiler (MVP) can obtain marine temperature and salinity profile observation data in real time, rapidly and on a large scale during the ship's navigation. It can master the marine hydrological and hydroacoustic structures, such as marine thermocline, pycnocline, and sound velocity profile. Tow-fish is the core component of MVP, and its hydrodynamic characteristics directly affect the observation efficiency of the marine temperature and salinity profile structure. In this paper, three-dimensional models of elliptical and Myring-type contour tow-fish bodies are constructed based on computational fluid dynamics (CFD) simulation. The hydrodynamic performance under small angle of attack conditions (1°~10°) is systematically compared, and the axial drag difference between the two configurations is analyzed through the body-tail coupling models. The Myring-type contour tow-fish with lower axial fluid resistance is selected as the research object for the measurement scenario of the tow-fish descent profile. The parametric scanning method is used to systematically study the influence of the position of the center of buoyancy and gravity on the radial stability of the tow-fish. Three optimized configuration schemes are designed: adjusting the center of buoyancy separately, regulating the center of gravity and center of buoyancy synchronously, and adjusting the center of gravity separately. The deflection angle of the tow-fish is compared and analyzed under different strategies. The results show that within the adjustment range of 0.05 m, adjusting the center of gravity separately can reduce the maximum deflection angle of the tow-fish by 12.186%. This strategy can significantly improve the radial stability while avoiding the complexity of multi-parameter coordinated regulation, and has good engineering practicability. In this paper, the theoretical framework of the optimal design of the hydrodynamic characteristics of the tow-fish is established. The proposed single-parameter center of gravity adjustment strategy provides a theoretical basis for the optimization of the hydrodynamic performance of the tow-fish. It has reference value for the structural optimization and stability control of marine observation equipment.

Keywords: tow-fish; hydrodynamic characteristics; CFD; optimization