

# 基于有限时间扩张状态观测器的水下机器人 精准跟踪控制系统设计

王 坤

(四川信息职业技术学院 软件学院, 四川 广元 628000)

**摘要:** 水下机器人在运动过程中极易受到水环境因素的干扰发生运动偏移, 为了保证水下机器人的精准、稳定航行, 利用有限时间扩张状态观测器优化设计水下机器人精准跟踪控制系统; 设计有限时间扩张状态观测器、水下机器人传感器、跟踪控制器和推进器, 强化硬件系统的密封防水设计强度, 完成系统硬件设计; 根据水下航行任务, 规划机器人的航行轨迹, 作为系统控制目标; 求解机器人位置、姿态角、速度等运动参数, 得出水下机器人的跟踪结果; 利用有限时间扩张状态观测器检测航行环境参数, 结合当前机器人状态的跟踪结果, 计算机器人运动控制量, 在硬件系统的支持下, 完成系统的精准跟踪控制功能; 通过系统测试实验得出结论, 静力水环境场景下水下机器人的平均位置跟踪误差为 14 m、平均角度控制误差为  $0.10^\circ$ , 航行速度控制误差为 0.5 m/s; 动力水环境场景下水下机器人的位置跟踪误差最大值为 9 m、平均角度控制误差为  $0.10^\circ$ 、航行速度控制误差为 0.5 m/s。

**关键词:** 有限时间扩张状态观测器; 水下机器人; 精准跟踪; 机器人控制系统

## Design of Precise Tracking Control System for Underwater Robots Based on Finite Time Extended State Observer

WANG Kun

(School of software, Sichuan Vocational College of Information Technology, Guangyuan 628000, China)

**Abstract:** Underwater robots are vulnerable to interference from water environment factors during movement, and it is necessary to design a precise and stable tracking control system to ensure its accurate navigation. Using limited time expansion state observer to optimize the design of underwater robot precise tracking control system. Design the limited time expansion state observer, underwater robot sensor, tracking controller and propeller, strengthen the sealing and waterproof design of the hardware system, and complete the system hardware design. According to the underwater navigation mission, plan the robot's trajectory and use it as the system control target. Solve the robot's position, attitude angle, speed and other motion parameters to obtain the tracking results of the underwater robots. Combined with the tracking results of the current robot state, the limited time expansion state observer is used to detect the navigation environment parameters, calculate the robot's motion control quantity, and complete the precise tracking control function with the support of the hardware system. Through system testing experiments, it is concluded that the average position tracking error of underwater robots in static water environment scenarios is 14 m, with an average angle control error of  $0.100$  and a navigation speed control error of 0.5 m/s; The maximum position tracking error of underwater robots in dynamic water environment scenarios is 9 m, with an average angle control error of  $0.10^\circ$  and a navigation speed control error of 0.5 m/s.

**Keyword:** finite time extended state observer; underwater robots; precise tracking; robot control system

## 0 引言

水下机器人是一种在水中工作的高强度作业机器人, 由于其在水中的生存条件和人类在水中的潜入能力都受到限制, 因而已经成为对海洋进行探索的一种重要手段。水下机器人可以在高度危险的环境、被污染的环境和零可见度的水域中, 代替人工在水下进行长时间的工作。在水下机器人内部通常都会装备有摄像机、照明灯和机械臂等设备, 它们可以向人们提供实时视频图像, 而机械臂则可以将重物抓取起来。目前水下机器人已广泛应用于安全探测、管道检测、科学与教学、考古与渔业、钻井平台水下结构

维护、海洋石油工程等领域。水下机器人综合了远程数据传输、环境参数感知等多种技术, 现在, 对于水下机器人机体所需的材料和科技, 都有了相应的解决方案, 但是随着水下机器人向更远、更深、更长航行时间发展, 一些关键技术还需要进一步深入研究, 其中, 水下机器人跟踪控制技术就是亟待研究内容之一。为保证水下机器人在水下环境中的航行安全与工作效率, 设计并开发了水下机器人精准跟踪控制系统。跟踪控制可以向移动目标提供空间定位、姿态、结构行为和性能。

当前已有相关领域研究学者对水下机器人精准跟踪控

收稿日期: 2023-08-04; 修回日期: 2023-09-20。

作者简介: 王 坤(1985-), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 王 坤. 基于有限时间扩张状态观测器的水下机器人精准跟踪控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(9): 149-156.

制系统作出了研究。文献 [1] 提出基于神经网络的水下机器人同步跟踪和控制系统, 综合考虑模型参数不确定性、外界扰动以及系统参数不确定等因素对系统性能的影响, 构建新型的辅助信号, 并在此基础上, 研究水下机器人的多自由度, 采用逆向跟踪与李雅普诺夫直行跟踪相结合的方法, 实现多自由度水下机器人的饱和自适应动态控制。文献 [2] 提出基于 CFD 水动力参数的水下机器人跟踪控制系统, 在水下机器人平面轨迹跟踪控制目标的基础上, 推导出了机器人系统三自由度运动方程, 利用 STAR-CCM+和 ANSYSQWA 软件, 分别获得了机器人阻力项参数和附加质量项参数, 并与机器人自身动力配置条件、计算得到的水动力参数相结合, 以反步法和滑模控制技术为基础, 得出控制策略的设计结果。文献 [3] 提出基于奇异摄动法的水下机器人控制系统, 采用时间分解法, 获得了水下机器人的快慢子系统模型, 然后按照奇异摄动法, 设计出了串-并联 PID 控制。在自主设计的水下机器人的基础上, 采用了最小二乘法, 来确定水动力参数根据水动力参数的计算结果得出水下机器人运动参数的控制指令。然而上述方法在实际应用过程中存在跟踪控制误差大的问题, 其主要原因是水下机器人对自身工作参数与周围环境的感知能力较差, 为此引入有限时间扩张状态观测器。

状态观测器是一种基于观测值对系统状态进行估计的动态设备, 它不仅使状态反馈技术的实现成为可能, 还被广泛地应用于控制领域。而有限时间扩张状态观测器是状态观测器中的一种, 可对系统中的不可测状态以及未知扰动进行观测。应用有限时间扩张状态观测器对水下机器人精准跟踪控制系统进行优化设计, 以期能够提升系统的跟踪控制功能, 间接地提升水下机器人的工作安全性。

### 1 水下机器人精准跟踪控制硬件系统设计

水下机器人精准跟踪控制系统需具备数据通信、运动数据与环境数据采集、运动控制等功能, 对水下机器人的跟踪控制精度及稳定性有很大的影响, 要想实现这一点, 就必须掌握水下机器人的当前姿态、速度等运行信息以及周围的深度、水动力等环境信息, 进而通过相关控制算法控制推进器电机的转向和转速调整机器人的运动参数。为了给水下机器人精准跟踪控制系统软件功能的实现提供硬件支持, 需要对部分硬件设备进行改装, 并加设有限时间扩张状态观测器, 结合硬件设备的改装结果调整系统内部电路的连接方式。

#### 1.1 水下机器人传感器

水下机器人传感器装设的目的是采集水下机器人的运动参数及其航行环境中的环境参数, 水下机器人运动参数具体包括: 位置、姿态、深度等, 选用 9 轴组合传感器芯片 MPU9250 作为水下机器人的姿态传感器, 该传感器内部集成了 3 轴陀螺仪传感器、3 轴加速度传感器、3 轴磁力计和 DMP<sup>[4]</sup>。深度计采用 KE-400 型号的投入式静压液位变送器, 其基于所测量的位置的水下压力与该位置的高度成正比的原理, 通过对水平仪进行温度补偿, 并进行线性校

正, 得到 0~3.3 V 的模拟电压。优化设计系统中使用的传感元件可以直接放入水中, 因此, 传感元件很小, 适用于狭小的水域。该液位变送器通过与陀螺仪和相关控制电机的集成可以实现水下机器人的定深运动<sup>[5]</sup>。水下机器人需要采集的航行环境参数具体包括水压、障碍物及其距离、水环境动力等, 其中水压传感器的工作原理如图 1 所示。

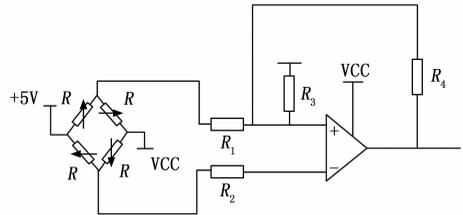


图 1 水压传感器工作电路图

水环境障碍物及其距离信息的采集使用超声波测距传感器, 该传感器由一个内置的 JLINK 接口、2 个发光二极管、超声波发送和接收电路以及 4 个 UART 串行接口组成。该芯片采用了 ARM 的 Cortex-M4 核、32 比特的单片机以及一个摄像接口, 该传感器可以对超声传回的目标距离进行接收并对其进行处理<sup>[6]</sup>。将上述传感器分别装设在水下机器人的各个位置上, 传感器之间的连接实现对水下机器人的精准跟踪。

#### 1.2 水下机器人跟踪控制器

水下机器人跟踪控制器是基于有限时间扩张状态观测器的水下机器人精准跟踪控制系统控制任务的执行元件, 其工作原理就是根据水下机器人传感器反馈的数据采集与分析结果, 通过与控制目标的比对确定机器人控制量, 并生成机器人的跟踪控制指令。水下机器人跟踪控制器选用 SXD320F2784 型号的控制芯片, 控制芯片结构如图 2 所示。

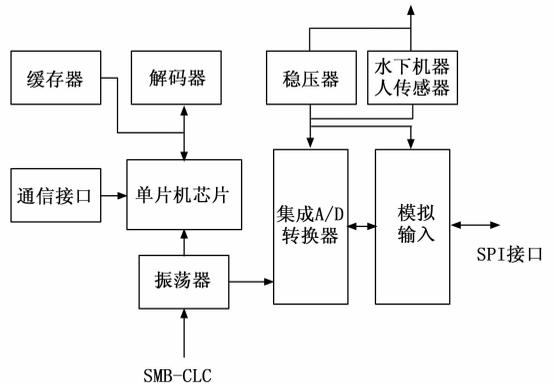


图 2 水下机器人跟踪控制芯片结构图

图 2 表示控制芯片拥有较高的数据处理速率, 可以快速地处理水下机器人所探测到的信息数据, 最多可以储存 258 Mb 的水下机器人运行数据<sup>[7]</sup>。

#### 1.3 水下推进器

推进器也就是水下机器人的运动驱动装置, 也就是跟踪控制器的直接作用对象, 能够为水下机器人的运动提供动力支持, 为满足水下机器人在不同场景下的航行与控制效果, 采用液压与电气相结合的方式, 液压驱动的基本原

理是通过液压油的压力变化产生的动能作用，使动作件上的受力部件移动，以实现机械或液压机械设备的动作<sup>[8]</sup>。液压驱动装置主要由油墨泵、管路、阀门等组成，液压泵用于实现液压油的回收，不断地将液压油吸入，通过高压油轮将液压油泵增压，然后再将增压后的液压油注入活塞室，再通过活塞杆将其再注入液压油管，通过阀门到各个液压机构，从而实现液压动力的应用。另外，电气驱动在水下推进器中，选择了 TurnigyAerodriveDST-700 直流无刷电机，电机内加设 Afro12AUltraLiteMulti-rotor 电调元件，可以实现对电机的调速。在对系统进行优化设计时，将电调的默认值设定为单向模式，系统运行过程中，按照控制需要，通过 USB 电调编程器与电调的编程线相连接，来完成电机模式的切换。

#### 1.4 系统硬件密封防水设计

水下机器人精准跟踪控制硬件系统中的所有元件均应用于水下工作环境，因此必须考虑防水密封要求，在各个硬件元件外加设排水罩<sup>[9]</sup>。排水罩采用内外“双环”结构形式，它能有效地产生两种压力不一样的气体，排水口外侧有 6 个通气口，从这 6 个通气口向内环和外环注入高压气体，在外环和内、外两环的共同作用下，将硬件设备和排水口下部的水全部排出，在不断向内压缩的高压气体和外界水压之间保持着动态平衡，形成了常压无水区。硬件装置与排水罩之间的连接处均使用了橡胶密封件，并将其压紧密封，将排水罩与防水本体通过螺纹转动连接，方便安装和拆卸。排水罩设备下端的透视窗口为透明的耐压玻璃，方便直接读取传感器输出的数据，并能抵御水下压力<sup>[10]</sup>。另外，还需要在排水罩中加设温湿度传感器，对硬件设备的工作环境进行监测，当温湿度超过安全范围时，向控制系统终端发出报警信号。

## 2 水下机器人精准跟踪控制系统软件功能设计

在硬件系统的支持下，优化设计的水下机器人精准跟踪控制系统软件部分的运行原理为：根据水下机器人的工作环境与航行任务，规划具体的航行路径，以此作为水下机器人的跟踪控制目标<sup>[11]</sup>。利用有限时间扩张状态观测器确定水下机器人的实时位姿与航行参数，将实时输出的位姿检测结果作为水下机器人的跟踪结果。利用传感器设备采集水下机器人航行环境的相关环境参数，由此分析水下机器人的受力情况，计算当前水下机器人跟踪结果与控制目标之间的差距，综合考虑环境因素计算水下机器人的控制量，以控制量为内容生成相应的跟踪控制指令，最终从水下机器人位置、速度、角度等方面，实现系统的精准跟踪与控制功能。

### 2.1 规划水下机器人航行轨迹

水下机器人的航行轨迹可以分为直线轨迹、曲线轨迹、螺旋轨迹等，需根据机器人的工作内容和水下环境的障碍物分布情况，规划水下机器人的实际航行轨迹。假设水下机器人的航行目标位置数量为 1，目标位置坐标为  $(x_{\text{target}}, y_{\text{target}}, z_{\text{target}})$ ，此时规划的航行轨迹为直线轨迹，规划结

果为：

$$l = \frac{(x_{\text{target}} - x_0)(z_{\text{target}} - z_0)}{(x - x_0)(y_{\text{target}} - y_0)(z - z_0)} \quad (1)$$

式中， $(x_0, y_0, z_0)$  表示的是水下机器人的初始位置，由此得出水下机器人直线轨迹的规划结果<sup>[12]</sup>。若水下机器人的目标位置数量不为 1，则需要根据水下机器人与目标位置的距离确定目标位置的到达顺序，水下机器人与目标位置之间距离的度量过程可以表示为：

$$d(i) = \sqrt{(x_{\text{target},i} - x_0)^2 + (y_{\text{target},i} - y_0)^2 + (z_{\text{target},i} - z_0)^2} \quad (2)$$

式中， $(x_{\text{target},i}, y_{\text{target},i}, z_{\text{target},i})$  表示第  $i$  个目标位置，同理可以得出水下环境中所有目标位置距离的度量结果，按照升序顺序对目标位置进行排列，利用公式 (1) 得出水下机器人当前位置与其距离最近目标之间的轨迹规划结果，在此基础上以距离最小目标位置为起点，重复上述规划流程，得出下一段轨迹的规划结果，以此类推得出所有目标节点之间轨迹的规划结果，最终利用公式 (3) 对初始规划轨迹进行平滑处理。

$$l_{\text{smooth}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{target}}} d(i) l h_B \quad (3)$$

式中， $n_{\text{target}}$  为设置轨迹中包含的目标节点数量， $h_B(\cdot)$  为轨迹的  $B$  样条平滑基函数。将初始规划的轨迹片段进行连接与平滑，即可得出水下机器人航行轨迹的规划结果<sup>[13]</sup>。在实际水下机器人跟踪控制过程中，需要考虑水下环境中的障碍物情况，若当前轨迹中存在障碍物，则需要利用公式 (4) 对轨迹中的对应节点进行调整。

$$\begin{cases} x_{\text{adjust}} = x_{\text{trajectory}} + \zeta_x \\ y_{\text{adjust}} = y_{\text{trajectory}} + \zeta_y, (x_{\text{trajectory}}, y_{\text{trajectory}}, z_{\text{trajectory}}) \in l_{\text{smooth}} \\ z_{\text{adjust}} = z_{\text{trajectory}} + \zeta_z \end{cases} \quad (4)$$

式中， $(x_{\text{trajectory}}, y_{\text{trajectory}}, z_{\text{trajectory}})$  为规划轨迹中任意节点的位置坐标， $\zeta_x$ 、 $\zeta_y$  和  $\zeta_z$  分别表示  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴方向上的调整分量。最终将调整后的节点添加到原轨迹中，得出水下机器人航行轨迹的最终规划结果。

### 2.2 跟踪水下机器人运动参数

在水下机器人内置传感器的支持下，获取机器人的实时位姿，实现水下机器人的实时跟踪。任意时刻水下机器人的位姿信息如图 3 所示。

从图 3 中可以看出，在水下机器人跟踪过程中需要收集的位姿数据具体包括纵荡位置、横荡位置、垂荡位置、横摇角、纵摇角和艏摇角，在已知水下环境中基准点坐标的情况下，利用测距传感器获取距离信息，并得出纵荡位置、横荡位置、垂荡位置参数的跟踪测试结果，可以量化表示为：

$$\begin{cases} x_t = d_x + x_{\text{reference}} \\ y_t = d_y + y_{\text{reference}} \\ z_t = \frac{(P_t - P_{\text{start}})}{\rho \cdot g} \cdot 10^4 \end{cases} \quad (5)$$

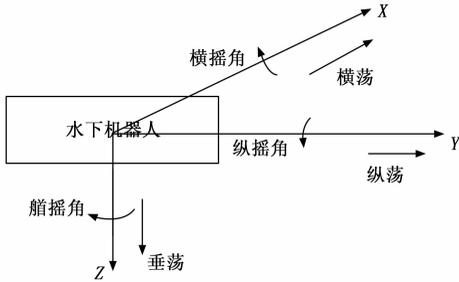


图 3 水下机器人位姿示意图

式中,  $d_x$  和  $d_y$  分别表示当前水下机器人位置与基准点之间距离在  $x$  和  $y$  轴方向上的分量,  $(x_{reference}, y_{reference})$  表示已知基准点的位置坐标,  $P_{start}$  和  $P_t$  分别为水下机器人的起点水压值及其在  $t$  时刻的水压值, 上述水压数据均可通过压力传感器直接得出,  $\rho$  为水环境中的液体密度,  $g$  表示重力加速度<sup>[14]</sup>。通过公式 (5) 的计算可以得出  $t$  时刻水下机器人位置信息的跟踪结果。该时刻水下机器人横摇角、纵摇角和艏摇角信息的跟踪参数如下:

$$\begin{cases} \theta_{rolling}(t) = \arctan\left(\frac{x_t}{y_t}\right) \\ \theta_{pitch}(t) = \arctan\left(\frac{x_t}{z_t}\right) \\ \theta_{yawing}(t) = \arctan\left(\frac{y_t}{z_t}\right) \end{cases} \quad (6)$$

将公式 (5) 的求解结果代入到公式 (6) 中, 即可得出水下机器人航行角度的跟踪结果。除机器人位姿外还需要对机器人的航行速度进行跟踪, 跟踪结果为:

$$v_t = \frac{\sqrt{(x_{t_2} - x_{t_1})^2 + (y_{t_2} - y_{t_1})^2 + (z_{t_2} - z_{t_1})^2}}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

式中,  $\sqrt{(x_{t_2} - x_{t_1})^2 + (y_{t_2} - y_{t_1})^2 + (z_{t_2} - z_{t_1})^2}$  表示一段时间内水下机器人的移动距离,  $t_2 - t_1$  为水下机器人的航行时间<sup>[15]</sup>。设置硬件系统中传感器的工作参数, 通过实时数据的采集得出水下机器人在任意时刻的跟踪结果。

### 2.3 有限时间扩张状态观测器

有限时间扩张状态观测器是一种在有限时间内对非线性系统状态进行估计的技术。这种技术的目标是设计一个观测器, 使其在有限时间内对系统状态进行精确估计, 同时不受初始状态误差的影响。

采用反馈原理, 利用有限时间扩张状态观测器观测偏差消除状态偏差。其设计的基本思路是: 构建与真实模型结构一致的估计模型, 通过对真实模型和估计模型间的误差进行计算进行修正, 逐步使状态值接近真实状态值。优化设计水下机器人精准跟踪控制系统中加设的有限时间扩张状态观测器内部结构如图 4 所示。

在传统状态观测器的基础上, 增加一个输出的偏差作为反馈来进行修正, 则可以逐渐减小状态估计值的误差。为了满足系统的需求, 需要在扩张状态观测器中添加一个定时器芯片, 该芯片采用 555 集成定时器。555 集成定时器

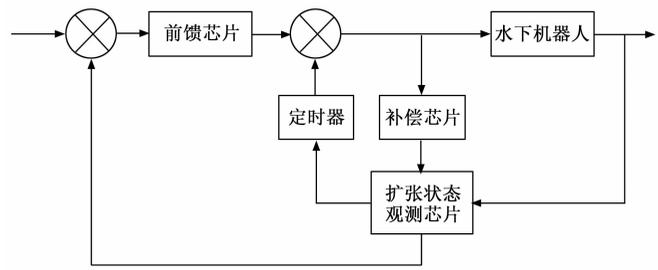


图 4 有限时间扩张状态观测器内部结构图

是一种常见的计时和脉冲发生器电路, 可以用于各种应用, 比如产生精确的时钟信号、计时器、频率测量等。该定时器由多种逻辑门、比较器和放大器组成, 能够以不同的方式生成稳定的脉冲波形。这种定时器芯片能够实现对扩张状态观测器有限时间的精确设定, 从而对系统中的各种参数进行有效的控制。此外, 通过将系统中装设扩张状态观测器的运行模式调整至自动模式, 可以更加便捷地对系统进行控制, 进而提高系统的可靠性和稳定性。

### 2.4 利用有限时间扩张状态观测器检测航行环境参数

为了保证水下机器人的跟踪控制精度, 提高系统鲁棒性, 同时减小水下机器人在控制过程中可能存在的抖振现象, 因此利用有限时间扩张状态观测器对水下机器人的航行环境干扰情况进行检测。将水下机器人航行环境未知项视为扩展状态, 将其量化表示为:

$$\begin{cases} \bar{\psi}_1 = \psi_2 \\ \bar{\psi}_2 = \psi_3 + \mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\tau_s - \mathbf{J}^{-1}\dot{\omega} \\ \bar{\psi}_3 = \varphi \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\varphi$  为扩展状态的一阶导数,  $\mathbf{J}$  和  $\mathbf{M}$  分别对应的是水下机器人附体坐标系与惯性坐标系之间的转换矩阵和质量矩阵,  $\omega$  为扰动变化率<sup>[16]</sup>。由此将有限时间扩张观测器量化表示为:

$$\mathbf{G} = \psi_1 \beta(t) + a \cdot r \quad (9)$$

式中,  $\beta(t)$  为  $t$  时刻观测器的状态向量,  $a$  表示扩张状态向量,  $r$  为观测器的输入值, 那么观测器的输出结果即为水下机器人航行环境参数的检测结果, 可以表示为:

$$\delta = G(\gamma_{outside}(t), \gamma_{internal}(t), t) + \kappa_{compensate} \quad (10)$$

式中,  $\gamma_{outside}(t)$  和  $\gamma_{internal}(t)$  分别表示外部扰动和内部扰动,  $G(\gamma_{outside}(t), \gamma_{internal}(t), t)$  为有限时间扩张状态观测器观测到的总扰动值,  $\kappa_{compensate}$  为补偿系数<sup>[17]</sup>。在跟踪控制系统中需要检测的航行环境参数具体包括水压、水动力等, 其中水压可以通过压力传感器直接得出, 水动力具体包括浮力、流体惯性力、流体粘性力等, 以浮力为例, 该参数的检测结果为:

$$F_{buoyancy} = \rho \cdot g \cdot V_{robot} \quad (11)$$

式中,  $V_{robot}$  为水下机器人在水环境中所占的体积值, 同理可以得出其他水动力分量参数的检测结果, 最终得出水下机器人航行环境外干扰总值为:

$$\gamma_{outside}(t) = F_{buoyancy} \otimes F_{inertial} \otimes F_{viscous} \quad (12)$$

式中,  $F_{inertial}$  和  $F_{viscous}$  对应的是流体惯性力和流体粘性力, 通过上述公式, 即可得出水下机器人航行环境参数的检测结果, 并通过有限时间扩张状态观测器输出。

### 2.5 计算水下机器人精准跟踪控制量

水下机器人的精准跟踪控制量主要为机器人位置、角度和速度, 而上述运动参数的控制需要水下推动器的驱动, 因此需要根据当前水下机器人跟踪位置与目标位置之间的差距, 确定机器人的运动控制量, 综合考虑运动控制量和外界环境干扰条件, 得出水下推动器的控制量<sup>[18]</sup>。水下机器人运动控制量中, 位置控制量的计算公式如下:

$$\begin{cases} c_x = |x_t - x_t(i)| \\ c_y = |y_t - y_t(i)|, [x_t(i), y_t(i), z_t(i)] \in I_{smooth} \\ c_z = |z_t - z_t(i)| \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $[x_t(i), y_t(i), z_t(i)]$  为初始规划水下机器人航行轨迹中的第  $i$  个轨迹点, 将实时位置信息的跟踪结果输入到公式 (13) 中, 即可得出  $c_x$ 、 $c_y$  和  $c_z$  的具体取值<sup>[19]</sup>。同理可以得出其他水下机器人运动控制量的计算结果, 根据运动参数与推动器之间的作用关系, 得出完成对应控制任务需要驱动量, 记为  $\lambda_0$ , 那么在考虑环境干扰的情况下, 得出水下推动器的实际控制量为:

$$c_{Pusher} = \lambda_0 \pm \delta \quad (14)$$

若当前水环境干扰方向与机器人的控制方向一致, 则公式 (14) 执行相减计算, 否则执行相加计算, 完成水下机器人精准跟踪控制量的计算。

### 2.6 实现水下机器人精准跟踪控制功能

将水下机器人精准跟踪控制量的计算结果输入到硬件系统的控制器中, 按照图 5 表示的控制逻辑, 生成水下机器人的跟踪控制指令。

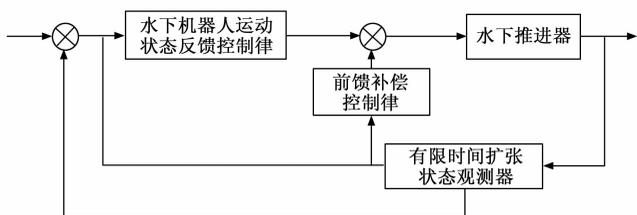


图 5 水下机器人精准跟踪控制逻辑图

将控制器输出的控制指令直接作用在水下推进器中, 实现对机器人内部各动力元件的驱动, 当传感器检测到当前水下机器人运动参数与设置控制目标一致时, 系统发出控制指令, 完成水下机器人的精准跟踪控制功能。

## 3 系统测试

为了测试优化设计的基于有限时间扩张状态观测器的水下机器人精准跟踪控制系统的跟踪与控制功能, 设计系统测试实验。此次实验主要分为两个部分, 第一部分是对水下机器人的跟踪精度进行测试, 通过设置水下机器人的初始航行路线作为跟踪精度的比对标准, 通过系统运行得出当前水下机器人运行参数的跟踪结果, 比对初始设置路

线信息与跟踪结果, 得出反映系统跟踪精度的测试结果。第二部分是对水下机器人控制精度进行测试, 即比对系统控制作用下水下机器人实际位置与设置控制目标之间的偏差, 从而体现出优化设计方法在控制功能方面的精准程度。

### 3.1 选择水下机器人控制对象

此次实验选择 H300-MK2 ROV 型号的水下机器人作为系统测试实验的控制对象, 该机器人可在 300 米深的水下工作。水下机器人在空气中的重量为 5.2 kg, 井水中最大航行速度为 30 m/s, 续航时间约为 6 h, 从外形结构上来看, 该机器人为鱼型仿生机器人。水下机器人具有标准的观察系统, 包括一架 10 倍变焦的摄影机, 能在不旋转 ROV 的情况下, 对周围的环境进行全景观察; 此外, 因为镜头上也装有高亮度的 LED 光源, 他们可以随着镜头的移动而移动<sup>[20]</sup>。有完整的 HDR 相机版本可供选择。电动操作手臂可以被安装在防滑器下面。H300-MK2 的重量很轻, 这使得它很容易操纵和发射。H300-MK2 在设计上具有很强的灵活性, 能够满足不同用户的需要, 并且在架构上也很容易地进入各个子系统, 因此很容易进行维护。一个符合人机工程学的单一控制器用来控制 ROV 和其他装置。脐带线缆被放置在手持绞车中, 很容易被运送, 并且带有一个滑环装置。水下机器人精准跟踪控制系统软件界面图如图 6 所示。



图 6 水下机器人精准跟踪控制系统软件界面图

### 3.2 生成水下机器人控制任务

通过控制水下环境中的水动力状态, 生成无水下干扰的静力场景, 也有水下干扰的动态场景, 静力场景和动态场景中, 水流速度分别为 0 km/h 和 15 km/h。分别在上述两个实验场景中, 生成多个控制任务, 控制任务具体包括机器人移动控制任务、转向控制任务等, 其中部分机器人移动控制任务的生成情况如图 7 所示。

记录水下机器人轨迹控制任务的相关信息, 从而确定水下机器人运动参数的控制目标。

### 3.3 描述系统测试实验过程

利用编程工具实现基于有限时间扩张状态观测器的水下机器人精准跟踪控制系统软件部分的开发, 将软件程序代入到主测计算机中, 并分别接入硬件系统装置和选择的水下机器人。将水下机器人放置到配置完成的水下环境中, 输入水下机器人初始航行轨迹和控制任务数据。同时将硬

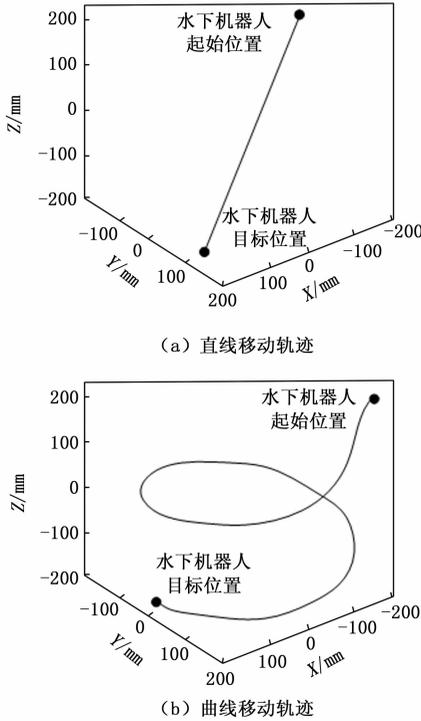


图 7 水下机器人轨迹控制任务示意图

件设备和水下机器人调整至工作状态，通过运动参数跟踪、环境参数检测、控制量计算等步骤，完成优化设计系统的精准跟踪与控制工作。

为了体现出优化设计系统在跟踪和控制功能方面的优势，分别设置传统的基于神经网络的水下机器人同步跟踪和控制系统和基于 CFD 水动力参数的水下机器人跟踪控制系统作为实验对比项，

其中，基于神经网络的水下机器人同步跟踪和控制系统的参数设置如下。

神经网络的层数：3；每层的神经元数：5；激活函数：ReLU 函数；训练算法：随机梯度下降算法。

CFD 水动力参数的水下机器人跟踪控制系统的参数设置为：CFD 软件：ANSYS Fluent；控制方程：Navier-Stokes 方程。

在相同的实验环境下完成两个对比系统的开发与运行，并得出相应的跟踪与控制功能测试数据结果。

### 3.4 设置系统测试测试指标

设置位置跟踪误差作为系统跟踪功能的量化测试指标，该指标的数值结果为：

$$\epsilon_{\text{Tracking-Location}} = |x_{\text{track}} - x_{\text{reality}}| + |y_{\text{track}} - y_{\text{reality}}| + |z_{\text{track}} - z_{\text{reality}}| \quad (15)$$

式中，参数  $(x_{\text{track}}, y_{\text{track}}, z_{\text{track}})$  和  $(x_{\text{reality}}, y_{\text{reality}}, z_{\text{reality}})$  分别表示水下机器人位置的跟踪结果和实际位置坐标。计算得出的水下机器人位置跟踪误差指标取值越小，证明对应系统的跟踪功能越优。另外系统控制功能的量化测试指标设置的是：角度控制误差和速度控制误差，上述指标的测试结果分别为：

$$\begin{cases} \epsilon_{\text{Control-angle}} = |\theta_{\text{control}} - \theta_{\text{target}}| \\ \epsilon_{\text{Control-Speed}} = |v_{\text{control}} - v_{\text{target}}| \end{cases} \quad (16)$$

其中： $\theta_{\text{control}}$  和  $\theta_{\text{target}}$  对应的是水下机器人姿态角的控制值和目标值， $v_{\text{control}}$  和  $v_{\text{target}}$  分别表示水下机器人航行速度的控制值和目标值，在实际测试过程中，水下机器人的姿态角需要综合考虑横摇角、纵摇角和艏摇角 3 个部分，最终得出  $\epsilon_{\text{Control-angle}}$  和  $\epsilon_{\text{Control-Speed}}$  的计算结果越小证明对应系统的控制功能越优。

### 3.5 系统测试实验结果与分析

#### 3.5.1 静力水环境

在静力水环境下，通过 3 种水下机器人精准跟踪控制系统的运行，输出水下机器人实时位置轨迹的跟踪结果，如图 8 所示。

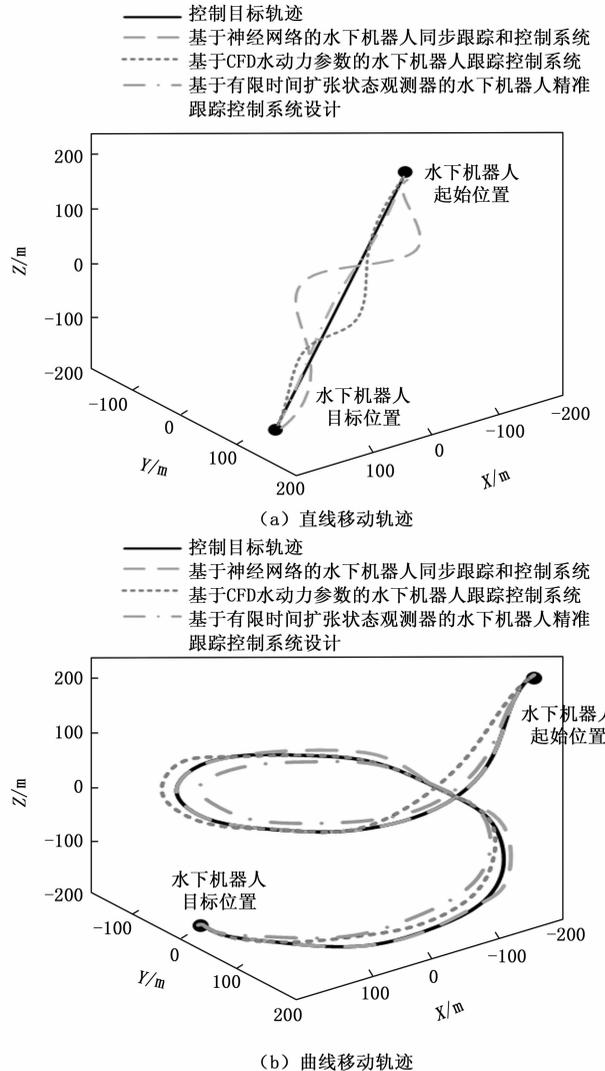


图 8 水下机器人轨迹跟踪结果

从图 8 中可以直观看出，与两种传统系统相比，优化设计系统输出的水下机器人位姿跟踪结果更接近水下机器人的实际移动轨迹。将图 8 中的相关数据代入到公式 (15) 中，计算得出 3 种系统的平均位置跟踪误差分别为 36 m、

28 m 和 14 m。另外静力水环境下 3 个系统的控制功能测试结果，如表 1 所示。

表 1 静力水环境下水下机器人控制功能测试数据表

时间节点		1	2	3	4
控制目标值	横摇角(°)	4.5	3.4	0.8	1.7
	纵摇角(°)	2.6	4.2	2.7	3.3
	艏摇角(°)	0.7	1.4	0.3	0.5
	航行速度/(m/s)	55	60	50	45
基于神经网络的水下机器人同步跟踪和控制系统的	横摇角(°)	4.0	3.9	0.4	1.2
	纵摇角(°)	2.3	4.7	2.2	3.4
	艏摇角(°)	0.8	1.9	0.7	0.7
	航行速度/(m/s)	59	64	53	41
基于 CFD 水动力参数的水下机器人跟踪控制系统的	横摇角(°)	4.7	3.1	0.9	1.9
	纵摇角(°)	2.3	4.4	2.8	3.4
	艏摇角(°)	0.5	1.6	0.6	0.7
	航行速度/(m/s)	57	62	52	43
基于有限时间扩张状态观测器的水下机器人精准跟踪控制系统的	横摇角(°)	4.5	3.4	0.9	1.7
	纵摇角(°)	2.5	4.2	2.7	3.3
	艏摇角(°)	0.7	1.5	0.3	0.6
	航行速度/(m/s)	55	61	51	45

将表 1 中的数据代入到公式 (16) 中，计算得出 3 个系统控制作用下平均角度控制误差分别为 1.13°、0.60° 和 0.10°，航行速度控制误差的平均值分别为 3.8 m/s、2.0 m/s 和 0.5 m/s。

### 3.5.2 动态水环境

在水下机器人样机的航行环境中添加水动力，重复上述操作，得出动态水环境下系统跟踪与控制功能的测试结果。综合纵荡、横荡、垂荡 3 个部分，通过公式 (15) 的计算，得出 3 个系统输出水下机器人位置跟踪误差的测试结果，如图 9 所示。

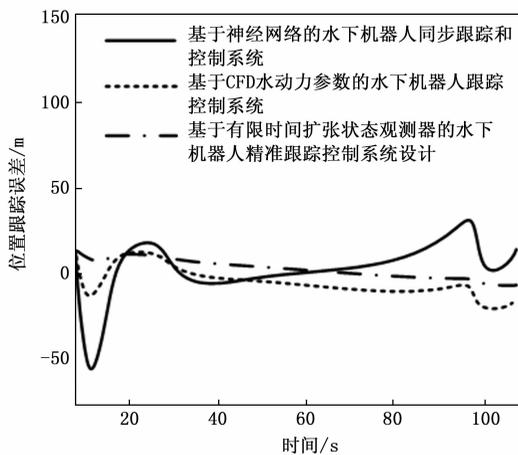


图 9 动态水环境下系统位置跟踪误差测试对比曲线

图 9 表示的测试结果，综合了直线轨迹与曲线轨迹两种轨迹形式，实验数据显示，3 种方法的误差随着时间的增加处于波动状态，基于神经网络的水下机器人同步跟踪和控制系统的跟踪误差最大值为 -60 m，基于 CFD 水动力

参数的水下机器人跟踪控制系统的位置跟踪误差最大值为 -60 m，基于有限时间扩张状态观测器的水下机器人精准跟踪控制系统的位置跟踪误差最大值为 9 m。该环境下水下机器人控制功能的测试结果如表 2 所示。

表 2 动态水环境下水下机器人控制功能测试数据表

时间节点		1	2	3	4
控制目标值	横摇角(°)	4.5	3.4	0.8	1.7
	纵摇角(°)	2.6	4.2	2.7	3.3
	艏摇角(°)	0.7	1.4	0.3	0.5
	航行速度/(m/s)	55	60	50	45
基于神经网络的水下机器人同步跟踪和控制系统的	横摇角(°)	3.7	4.2	0.3	1.1
	纵摇角(°)	2.1	4.9	2.0	3.7
	艏摇角(°)	0.9	2.1	0.9	0.8
	航行速度/(m/s)	61	66	54	40
基于 CFD 水动力参数的水下机器人跟踪控制系统的	横摇角(°)	4.9	3.0	1.1	2.0
	纵摇角(°)	2.2	4.1	2.9	3.4
	艏摇角(°)	0.9	1.7	0.7	0.9
	航行速度/(m/s)	58	64	54	45
基于有限时间扩张状态观测器的水下机器人精准跟踪控制系统的	横摇角(°)	4.5	3.4	0.9	1.7
	纵摇角(°)	2.5	4.2	2.7	3.3
	艏摇角(°)	0.7	1.5	0.3	0.6
	航行速度/(m/s)	56	60	51	45

将表 2 中的数据代入到公式 (16) 中，得出 3 个系统控制作用下平均角度控制误差分别为 1.70°、0.88° 和 0.10°，航行速度控制误差的平均值分别为 5.3 m/s、2.8 m/s 和 0.5 m/s。综合上述两种环境下的测试结果，发现优化设计系统的跟踪误差和控制误差均低于两个对比系统，且优化设计系统的跟踪与控制误差在两种水环境下的测试结果未发生明显变化，由此证明优化设计系统能够适应复杂的水下环境。

## 4 结束语

本文设计了一种基于有限时间扩张状态观测器的水下机器人精准跟踪控制系统。通过使用有限时间扩张状态观测器，实时获取水下机器人的状态信息，并将其反馈给控制器进行快速而精确的控制。实验结果表明，该系统能够有效提高水下机器人的跟踪性能和控制精度。在实际应用中，水下机器人经常需要在复杂的水下环境中完成任务，如海底勘探、海洋科学研究等。本文的研究对于提高水下机器人的自主性、稳定性和精确性具有重要意义。

### 参考文献：

[1] 方 凯, 姚佳琪, 李家旺. 基于神经网络的欠驱动水下机器人三维同步跟踪和镇定控制 [J]. 控制理论与应用, 2021, 38 (6): 731-738.

[2] 罗一汉, 吴家鸣, 周汇锋. 基于 CFD 水动力参数的水下机器人轨迹跟踪控制 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17 (3): 237-245.

[3] 王鸿儒, 刘云平, 马金虎, 等. 基于奇异摄动法的水下机器人

串—并联 PID 控制 [J]. 空间控制技术与应用, 2021, 47 (3): 40-48.

[4] 殷宝吉, 朱华伦, 唐文献, 等. 微小型水下机器人断电保护方法及艏向跟踪性能研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41 (4): 1-4.

[5] 陈浩华, 赵红, 王宁, 等. 复杂扰动下水下机器人的轨迹精确跟踪控制 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17 (2): 98-108.

[6] 吴伟, 曾庆军, 王阳, 等. 水下机器人多电机协同模糊滑模控制研究 [J]. 中国测试, 2021, 47 (11): 101-106.

[7] 华长春, 陈传虎, 陈健楠, 等. 基于干扰观测器的水下机器人预定性能控制 [J]. 控制与决策, 2022, 37 (5): 1160-1166.

[8] 许顺源, 吴家鸣, 马承华, 等. 带缆水下机器人转首控制及水动力分析 [J]. 中国造船, 2022, 63 (2): 126-136.

[9] 龚成勇, 刘康, 曾永亮. 基于改进蝙蝠算法的水下机器人避障路径优化方法 [J]. 探测与控制学报, 2022, 44 (4): 118-122.

[10] 裴香丽, 张明路, 田颖, 等. 自主式水下机器人控制方法研究 [J]. 火力与指挥控制, 2021, 46 (10): 1-6.

[11] 周焕银, 郝以阁. 基于自主水下机器人航向运动的动态状态反馈控制研究 [J]. 控制工程, 2022, 29 (12): 2244-2249.

[12] 王兴华, 田宇. 一种自主/遥控水下机器人共享控制方法 (上接第 132 页)

些参数对模型进行训练。综上, 本文提出的 SSA-TSVR 飞机状态预测模型能够实现在地面端根据不完整传输数据对飞机状态进行预测, 对飞行安全的保障有一定意义。

参考文献:

[1] 陈新源. 基于机载设备的航空器异常状态监控与仿真验证 [D]. 济南: 山东大学, 2022.

[2] 张鹏, 刘宁敏. 基于多源数据的航班监控优化研究 [J]. 民航学报, 2020, 4 (6): 29-32.

[3] COSTIN A, FRANCLON A. Ghost in the Air (Traffic): On insecurity of ADS-B protocol and practical attacks on ADS-B devices [J]. Black Hat USA, 2012: 1-12.

[4] 郭静. 中国民航空数据链的建设、发展与应用 [J]. 中国民用航空, 2006 (3): 64-66.

[5] 罗帆, 平芸, 郭仕平等. 民航飞行品质监控及预警管理探索 [J]. 交通运输工程学报, 2002, (3): 108-111.

[6] 黄永芳. 飞机状态监控系统的数据处理与应用技术 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.

[7] 孙禾. 航空器飞行状态预测方法研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2017.

[8] 韩云祥, 汤新民, 韩松臣. 基于混杂系统理论的无冲突 4D 航迹预测 [J]. 西南交通大学学报, 2012, 47 (6): 1069-1074.

[9] KOU J, ZHANG W. Multi-fidelity modeling framework for nonlinear unsteady aerodynamics of airfoils [J]. Applied Mathematical Modeling, 2019, 76: 832-855

[10] 王经纬, 高艳鹏, 宋瀚兴等. 基于 Transformer 的飞机状态预测 [J]. 计算机工程与设计, 2024, 45 (2): 477-483

[11] 李桂毅. 基于航迹数据的航路网络交通运行态势识别与预测

[J]. 机械设计与制造, 2021 (8): 281-285.

[13] 向红标, 程旭, 李梦伟, 等. 磁弹性微型游泳机器人在外部干扰和复杂路径下的精确跟踪控制 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (7): 93-102.

[14] 杨俊豪, 王炳炎, 余志伟, 等. 水下用机器人遥操作模式下主从端设备空间映射控制算法研究 [J]. 核动力工程, 2023, 44 (1): 204-209.

[15] 何涛, 王传礼, 高博, 等. 煤矿抽水蓄能电站水下巡检机器人姿态调节系统建模与分析 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50 (3): 239-247.

[16] 赵洪坛, 朱大奇. UUV 水下模型预测滑模跟踪控制算法 [J]. 控制工程, 2022, 29 (7): 1195-1203.

[17] 毛竞航, 吕海宁, 杨建民, 等. 基于模糊 PID 的深海采矿机器人路径跟踪控制 [J]. 海洋工程, 2021, 39 (5): 151-161.

[18] 滕建平, 梁霄, 陶浩, 等. 无人水下航行器全局路径规划及有限时间跟踪控制 [J]. 上海海事大学学报, 2022, 43 (1): 1-7.

[19] 王琪, 孔德彭. 自由漂浮双臂空间机器人末端轨迹跟踪控制 [J]. 机械设计与制造, 2022 (12): 68-72.

[20] 于树友, 常欢, 孟凌宇, 等. 基于扰动观测器的轮式移动机器人滚动时域路径跟踪控制 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2021, 51 (3): 1097-1105.

技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

[12] 赵元棣, 孙禾. 航空器飞行状态预测的混合模型研究 [J]. 飞行力学, 2016, 34 (4): 81-85.

[13] 何磊, 张显才, 钱炜祺等. 基于长短时记忆神经网络的非定常气动力建模方法 [J]. 飞行力学, 2021, 39 (5): 8-12.

[14] 方景龙, 成铄. 复杂分类问题支持向量机的简化 [J]. 电子学报, 2007, 35 (5): 858-861.

[15] 曾志强, 高济. 基于向量集约简的精简支持向量机 [J]. 软件学报, 2007, 18 (11): 2719-2727.

[16] CORTES C, VAPNIK VN. Support vector networks [J]. Machine Learning, 1995, 20: 273-297

[17] JAYADEVA KR, SURESH C. Twin support vector machines for pattern classification [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29 (5): 905-910.

[18] 黄华娟. 孪生支持向量机关键问题的研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.

[19] PENG X J. TSVR: An efficient twin support vector machine for regression [J]. Neural Networks, 2010, 23 (3): 365-372.

[20] 方建文. 孪生支持向量回归机的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2020.

[21] 麻芳兰, 罗晓虎, 李科等. 基于正则化 TSVR 的甘蔗收割机切割器入土切割负载压力预测研究 [J]. 中国农机化学报, 2021, 42 (2): 8-14.

[22] MOHIT J, VIJANDER S, ASHA R. A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2018, 44 (27): 1-28.

[23] 李金洋. 基于飞鼠搜索算法优化支持向量机的轴承健康管理研究 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2022.