

海流干扰下水下机器人快速动态响应的控制方法

李婷婷

(晋中职业技术学院, 山西 晋中 030600)

摘 要: 为清晰掌握水下机器人的响应运动状态, 提出海流干扰下水下机器人的快速动态响应控制方法。利用平面坐标系, 确定机器人的主体运动方程, 完成海流干扰下水下机器人的运动建模。在此基础上, 通过计算海流动力混编结果的方式, 换算水下机器人的响应控制推力, 并确定动态响应边界条件, 完成海流干扰下水下机器人快速动态响应控制方法的搭建。对比实验结果表明, 与现有技术手段相比, 应用新型控制方法后, 水下机器人响应运动速度曲线、加速度曲线与理想曲线间的差值明显缩小, 整体响应运动状态得到清晰描述。

关键词: 海流干扰; 动态响应; 机器人控制; 坐标系; 运动方程; 动力混编; 推理换算; 边界条件

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

文章编号: 1672 - 7649(2019)3A - 0046 - 03 **doi:** 10.3404/j.issn.1672 - 7649.2019.3A.016

Control method of rapid dynamic response of underwater vehicle under current disturbance

LI Ting-ting

(Jinzhong Vocational and Technical College, Jinzhong 030600, China)

Abstract: In order to clearly grasp the response motion state of the underwater vehicle, a fast dynamic response control method of the underwater vehicle under sea current interference is proposed. Using plane coordinate system, the main motion equation of the underwater vehicle is determined, and the motion model of the underwater vehicle under the disturbance of ocean current is completed. On this basis, the response control thrust of the underwater vehicle is converted by calculating the results of the dynamic mixing of ocean currents, and the dynamic response boundary conditions are determined to complete the construction of the fast dynamic response control method of the underwater vehicle under the disturbance of ocean currents. The experimental results show that the difference between the response velocity curve, acceleration curve and ideal curve of the underwater vehicle is significantly reduced and the overall response motion state is clearly described after the application of the new control method compared with the existing technical means.

Key words: current disturbance; dynamic response; robot control; coordinate system; motion equation; dynamic mixing; reasoning conversion; boundary conditions

0 引 言

在建立水下机器人运动状态数学模型时, 必须结合既定的坐标系参量, 对相关运动变量指标进行简化处理^[1]。自 20 世纪中期开始, 如何通过物理运算的方式, 对水下机器人进行有效的响应控制, 已经成为国内外的重要研究课题。现有技术手段将海水流场特征作为变量, 并在滑移网格技术的支持下, 计算机器人在水下运动时各个物理结构所受到的推力特征, 再按照动态响应姿态轨迹的运动趋势, 分析相关可控节点的具体位置, 但这种方法始终不能清晰反映出水下机器人响应运动速度曲线、加速度曲线的变化趋势。为

解决上述问题, 建立明确的平面坐标系, 并在其中换算控制推力、计算海流动力混编效应, 最终通过统一响应边界条件的方式, 建立一种新型的海流干扰下水下机器人的快速动态响应控制方法, 并设计仿真实验, 对比突出该方法的实用性。

1 海流干扰下的水下机器人运动建模

在海流干扰情况下, 建立关于水下机器人运动状态的数学模型, 是掌握机器人响应条件的重要前提。

1.1 坐标系的建立及转换

海流干扰既是一个复杂的外界施压环境, 也会对水下机器人造成一定的非线性动力影响。在一定的物

收稿日期: 2018 - 11 - 07

作者简介: 李婷婷(1983 -), 女, 本科, 讲师, 研究方向为机电自动化控制。

理范围内, 海水流体的流动速度有限, 水下机器人依然具备较强的自主响应能力, 但通常情况下, 这种范围区间不会超过母船体半径的 $1/2$ ^[2]。设工作母船所属直线、水下机器人所属直线间的物理具体刚好为母船体半径的 $1/2$, 工作母船右下端节点作为空间坐标原点 $o(0,0,0)$, 母船与机器人间的连接缆绳随海水自由流动。利用上述物理关系, 可将海流干扰下水下机器人的运动坐标系表示为图 1。

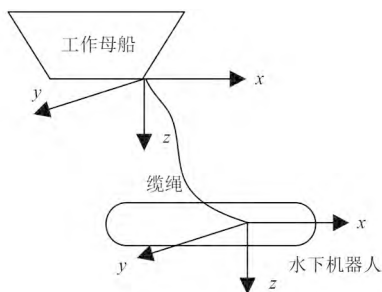


图 1 海流干扰下水下机器人的运动坐标系结构

Fig. 1 Motion coordinate system structure of underwater vehicle under ocean current disturbance

1.2 机器人主体运动方程

当水下机器人与工作母船间的水平距离始终保持为母船体半径的 $1/2$ 时, 随着海流干扰时间的不断累加, 机器人会受到静水回复力、水动力、缆绳张力、横向响应推动力等多项外界力效应。若将水下机器人视为整体系统, 则这些外界力效应彼此之间可进行一定的物理加成处理, 使所有效果力力矩都得到物理统一。设 P 代表静水回复力、 I 代表水动力、 U 代表缆绳张力、 T 代表横向响应推动力, 根据力的加成果效可将水下机器人所受合力 F 表示为:

$$F = F_P + F_I + F_U + F_T. \quad (1)$$

式中所有效果力均保持原始作用方向, 即与合力方向相同时, 该力的作用效果为正, 反之则为负。

设 λ 代表外界效应力的合力矩, 利用公式 (1) 可将水下机器人的主体运动方程表示为:

$$W = F\lambda\cos\theta. \quad (2)$$

其中, θ 代表海流干扰下水下机器人所受合力与运动方向间的夹角, $\cos\theta$ 代表该夹角的余弦值。

2 基于数学模型的快速动态响应控制

在海流干扰下水下机器人运动建模条件的基础上, 按照动力混编计算、响应推力换算、动态边界条件确定的物理流程, 完成新型快速动态响应控制方法的搭建。

2.1 海流动力混编计算

在与工作母船保持合理距离条件的前提下, 水下

机器人可自行调整所处深度, 但在不同海况条件下进行物理作业时, 海流对机器人响应运动所施加的压力也完全不同。因此, 在纵深角度求取海流对水下机器人的响应影响偏移量显得极为不可取。根据水下机器人运动建模条件可知, 海流对机器人所施加的外力始终与机器人运动方向存在一定的夹角, 且该角度不可能等于 0° 或 180° (0° 条件下, 水下机器人会在海流作用下逐渐脱离工作母船的控制范围; 180° 条件下, 海流作用会对水下机器人施加完全相反的作用力)^[3]。在工作母船的控制范围内, 海流对水下机器人所施加外力与机器人运动方向存在的夹角, 始终与一个惯性定量保持相同的变化关系, 而该惯性定量即为海流的动力混编量。设 r 代表水下机器人当前所处深度条件下的海流施力条件, 联立公式 (2) 可将海流的动力混编量表示为:

$$\chi = \frac{c \cdot \sqrt{rW^2}}{V_s - V_t}. \quad (3)$$

其中, V_s 代表水下机器人可能出现的最大运动位移量, V_t 代表水下机器人实际出现的运动位移量, c 代表当前深度海流体具备的周期性混编系数。

2.2 水下机器人的响应控制推力换算

当海流体对水下船体造成持续干扰时, 海流动力混编量成为影响机器人响应控制推力的重要因素。通常情况下, 水下机器人响应控制推力是由工作母船的微小运动量引起的, 且随着海流总推力作用的持续增加, 微小运动量虽然始终不能改变母船在运动坐标系中所处位置, 但是会使水下机器人所受合力与其运动方向间的夹角不断增加, 进而影响机器人的动态响应状态。假设 k 代表工作母船微小运动量的上限数值, l 代表工作母船微小运动量的下限数值, 联立公式 (3) 可将水下机器人的响应控制推力换算结果表示为:

$$s = f_\theta \left(dj + \frac{1}{\mu} \sum_{l=0}^k v \cdot \chi \right). \quad (4)$$

其中, f_θ 代表水下机器人所受合力与其运动方向间夹角为 θ 时的海流推动量, d 代表纵向海流推动子, j 代表纵向海流推动子, μ 代表响应控制参量, v 代表水下机器人的理想响应周期, χ 代表推力换算条件。

2.3 动态响应边界条件确定

动态响应边界条件也叫工作母船对水下机器人的理想控制范围, 常以母船所属直线、水下机器人所属直线间的物理距离作为判别条件。在海流干扰条件下, 水下机器人总是保持较为复杂的受力状态, 且随着外力施加量的不断累加, 工作母船对水下机器人的有效控制效果也逐渐削弱^[4]。因此, 当母船不再对水

下机器人进行控制时,这种关联性的动态响应达到最大值,即动态响应边界条件。设 R 代表母船体半径,联立公式(4)可将动态响应边界条件表示为:

$$M = \eta s + \hat{b}p < \frac{1}{2}R. \quad (5)$$

其中, η 代表理想状态下的响应控制推力换算量, \hat{b} 代表海流干扰对水下机器人的物理控制向量, p 代表周期控制权误差。将所有物理参量整合至上述运算公式中,完成海流干扰下水下机器人快速动态响应控制方法的搭建。

3 运动仿真

采用理想仿真模型模拟水下机器人在海流干扰下的物理运动状态,分别应用现有理论手段和新型技术方法对机器人的动态响应情况进行控制。图2反映了3种状态下,海流干扰下水下机器人动态响应运动曲线的变化情况。

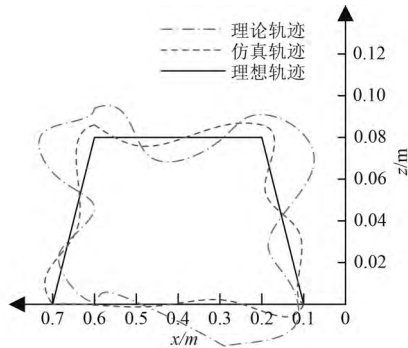


图2 水下机器人快速动态响应曲线图

Fig. 2 Rapid dynamic response curve of underwater vehicle

由图2可知,理想状态下,水下机器人快速动态响应曲线呈现梯形状;应用新型控制方法后的仿真曲线虽然与理想曲线不完全一致,但大体上依然保持梯形状;应用现有控制方法后的理论曲线与理想曲线出入较大,基本已经完全脱离梯形状。

截取0–25 min之间的水下机器人运动响应速度曲线如图3所示。

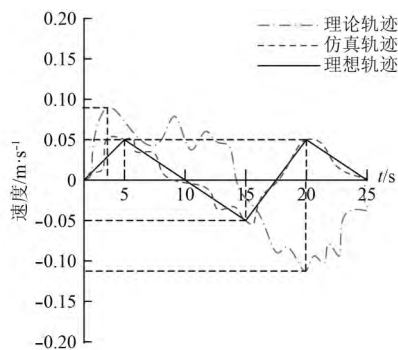


图3 水下机器人运动响应速度曲线图

Fig. 3 Motion response velocity curve of underwater vehicle

由图3可知,在单独分割机器人运动响应速度时,理想状态下的曲线类似于正弦波变化,但变化周期时间不固定;应用新型控制方法后的仿真曲线与理想曲线出入较小,整体依然保持着周期不固定的正弦波变化状态;应用现有控制方法后的理论曲线与理想曲线基本背道而驰,无论是变化周期还是波动峰谷值均不相同。

截取0–25 min之间的水下机器人运动响应加速度变化趋势,如表1所示。

表1 水下机器人运动响应加速度对比表

Tab. 1 Acceleration contrast table for motion response of underwater vehicles

实验时间/min	理想加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	仿真加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	理论加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
5	0.25	0.21	-0.19
10	0	0.04	0.13
15	-0.25	-0.29	0.37
20	0	-0.01	0.18
25	0.25	0.27	-0.06

分析表1可知,在单独分割机器人运动响应加速度时,理想状态下的变化趋势呈现良好的周期性,无论正向、反向运行阶段,加速度变化量的绝对值始终保持一致;应用新型控制方法后的机器人运动响应加速度,虽然不能与理想状态保持一致,但整体变化趋势不发生改变,变化量绝对值的产值也相差甚小;应用现有控制方法后的机器人运动响应加速度完全失去规律性,整体变化状态完全脱离理想变化状态。

综上所述,应用新型控制方法后,虽然不能使水下机器人响应运动状态与理想结果完全一致,但可以使二者无限接近。与现有技术方法相比,控制效果提升明显,达到预期标准结果。

4 结 语

海流干扰是影响水下机器人动态响应结果的重要物理条件,为更好控制这种影响因素,在以工作母船为原点的坐标系中,计算海流动力混编量等参数,并在机器人运动方程的支持下,完成响应边界条件的确定,达到控制水下机器人动态响应速度与加速度的目的。

参考文献:

- [1] 徐海峰,赵龙章,唐朝,王鹏. 永磁同步电机速度响应优化控制研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(3): 176–179.
- [2] 徐海祥,瞿洋,余文墨,等. 基于动态执行机构的欠驱船舶循迹控制[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(1): 6–10.
- [3] 蔡宝玲,高海东,王剑钊,等. 二次再热超超临界机组动态特性分析及控制策略验证[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5288–5299.
- [4] 高华东,扈亦越,王丽雅. 集成运放容性负载的瞬态响应分析及补偿[J]. 电子设计工程, 2018, 26(1): 153–156.