

无人船运动控制方法综述

裴志远¹, 戴永寿¹, 李立刚¹, 金久才², 邵峰¹

(1. 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 为实现无人船海上自主作业, 无人船运动控制的快速性、准确性以及鲁棒性亟待提高。首先从全驱动控制和欠驱动控制角度, 分别概括了国内外无人船航向控制、航速控制、轨迹跟踪控制以及路径跟踪控制的主流控制方法。其次, 归纳总结了处理海洋环境不确定扰动的研究进展, 包括扰动的建模和消除、抑制扰动的主流方法。最后, 总结了无人船运动控制现状与存在的问题, 并从工程应用和理论研究两个角度对未来的研究方向进行了展望。

关键词: 无人船; 运动控制; 模型不确定性; 环境扰动的处理

中图分类号: U664.82 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2020)03-0153-10

DOI: 10.11759/hyxx20190611004

无人船(Unmanned Surface Vehicles, USV)的研究可以追溯到二战期间(1939—1945年), 无人船仅作为一种半自主遥控水面平台被应用于军事任务, 更多相关的项目直到20世纪90年代才开始大量出现。美国的“Spartan Scout”号能够完成军事侦察、情报采集与传送等军事任务。以色列研发了“Protector”号水面高速自主无人船, 具有自适应能力的“Argent Marlin”号无人船, 将无人船的发展推到了一个新的高度。国内有关无人船的研究起步相对较晚, 目前国内主要的研究单位有: 中国航天科工集团、哈尔滨工程大学、大连理工大学、大连海事大学、上海海事大学等。我国研究人员在无人船方面进行了大量的研究工作并取得了很多优秀成果。例如, 中国航天科工集团自主研发的“天象一号”无人船, 为青岛奥帆赛提供了气象保障。此外, 云州智能与科微智能两家公司致力于发展无人船产业, 其中云州智能自主研发的“领航者号”海洋高速无人船受到了李克强总理的称赞。在科研人员的共同努力下, 国内无人船领域的相关技术正在迎头赶上。

无人船作为一种无人海洋智能运载平台, 可以在海洋中承担长时间、大范围、低成本的海洋科研与工程任务, 有广阔的应用前景。无人船的研究涉及流体力学、系统工程、计算机科学、结构力学、船型设计、自动控制等诸多领域, 无人船需要在复杂的海洋环境中自主航行与作业, 因此他对操纵性、控制性能和可靠性均提出了更为苛刻的要求。其中无人

船的运动控制^[1-2]技术是实现无人船海上自主作业的关键部分。无人船的运动控制问题主要包括: 航速控制、航向控制、路径跟踪控制、轨迹跟踪控制等内容。路径跟踪控制要求船舶跟踪某条期望路径, 而不用考虑时间约束。轨迹跟踪控制要求船舶跟踪某条依赖于时间的轨迹, 对速度有严格的要求, 相比轨迹跟踪问题, 路径跟踪允许更加光滑地收敛到期望路径。虽然两者之间对速度的要求不同, 但是两者对于无人船的欠驱动、非线性、系统不确定性等问题的处理是一致的。因此, 后文不再对两者进行区分。

针对上述4个无人船运动控制问题, 本文将无人船的运动控制分为欠驱动控制与全驱动控制。欠驱动性是指: 某个系统自由度的维数为 n , 而系统控制输入张量空间的维数为 m , 如果 $m=n$, 则该系统属于全驱动控制; 若 $m<n$, 该系统具有欠驱动性, 欠驱动系统的特点是由较少维数的输入, 控制其在较多维的广义空间内的运动。无人船一般只有推力与转

收稿日期: 2019-06-11; 修回日期: 2019-11-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1405203); 中央高校基本科研业务费专项资助(19CX05003A-1); 中央高校基本科研业务费专项资助(17CX02079)

[Foundation: The National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFC1405203; the Fundamental Research for the Central Universities, No. 19CX05003A-1; the Fundamental Research for the Central Universities, No. 17CX02079]

作者简介: 裴志远(1996-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事无人船控制研究, 电话: 15666791591, E-mail: 577232138@qq.com; 戴永寿(1963-), 通信作者, 男, 安徽巢湖人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事无人船控制研究, 电话: 13305468631, E-mail: daiys@upc.edu.cn

船力矩两个输入,没有配备横向推进器。因此,按照上述欠驱动性的定义,航向控制、航速控制都有输入直接控制,属于全驱动控制。而路径跟踪、轨迹跟踪是在平面内作三自由度运动,但由于横向动力缺失,无法直接完成横移运动,故属于欠驱动控制。除了欠驱动性,复杂多变的海洋环境也给无人船的运动控制带来很多问题,主要包括风浪流对无人船的直接扰动与无人船模型不确定性两种。因此,本文从全驱动控制、欠驱动控制和海洋环境扰动的处理 3 个部分进行综述。

1 全驱动控制

在无人船运动控制中,全驱动控制是指航速与航向控制(speed and heading control, SHC),即船舶在复杂海洋环境下的速度控制和艏向控制问题。主要研究方法有比例积分微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制及其改进、自抗扰控制、无模型控制、预测函数控制等。

1.1 PID 控制及其改进

PID 控制作为最早实用化的控制器已有近百年历史,现在仍然是应用最广泛的工业控制器。但是传统 PID 参数一旦确定以后,在运行过程中不能实时修改,这使得传统 PID 不能有效地应对无人船复杂多变的工作环境。因此,为了提高传统 PID 的自适应能力,学者们在传统 PID 控制的基础上做了很多改进。李永涛^[3]采用了 PD 控制,考虑了无人船航行过程中由于环境干扰造成的横摇运动。分别计航向控制器与减横摇控制器,能够在跟踪期望航向的基础上减弱横摇带来的扰动。郑烈心^[4]为了提高 PID 抵抗外界扰动与参数摄动的能力,采用了鲁棒 PID 控制。为进一步提高控制性能,将滑模变结构控制加入鲁棒 PID 控制中,改善了 PID 的系统超调、快速响应和稳态性能之间的矛盾。田勇^[5]针对 PID 控制在执行器幅值受限情况下积分器容易饱和的问题,提出抗饱和 PID。高双^[6]、黄西密^[7]将模糊控制引入 PID 中,结合模糊推理的方式实现了 PID 参数的实时整定,改善船舶航向控制性能。廖煜雷^[8]对模糊 PID 进一步优化,用 S 曲面代替模糊规则形成了 S 面控制,S 面控制器是非线性的,相比 PID 控制更适合于非线性系统。Miao 等^[9]提出了一种自适应专家 S-PID 算法,利用专家经验实时优化 S 面的参数进一步提高了控制性能。隋晓丽^[10]提出基于 BP 神经网络 PID

的航向控制,利用神经网络学习能力与逼近任意非线性函数的能力调节 PID 参数,优化控制效果。董早鹏^[11]采用了基于 T-S 模型的模糊神经网络控制,设计了一种模糊神经网络混合体系结构用于学习、调整和优化 T-S 模型中控制规则的线性组合系数。

1.2 自抗扰控制

自抗扰控制是王京清针对 PID 存在的缺陷提出的,不依赖被控对象的精确数学模型。由跟踪微分器(tracking differentiator)、扩展状态观测器(extended state observer)和非线性状态误差反馈控制律(nonlinear state error feedback law)三部分组成,其核心思想是利用扩展状态观测器对系统内、外扰动进行动态估计与补偿。但是控制器的设计过程中有许多的非线性结构,参数调节难度大,此外,控制器中有些非线性环节是通过经验总结得出的,缺乏理论证明。王雨迪^[12]阐述了 PID 控制的固有缺陷,由此引出自抗扰控制。分别进行了在海浪干扰与参数摄动下的仿真,验证了其有效性。姜涛^[13]将 RBF 神经网络加入自抗扰控制,在线调整非线性误差反馈模块的两个参数。李鹏^[14]基于 Norrbin 模型设计了线性自抗扰控制器。针对自抗扰控制中非线性结构,对扩张状态观测器进行线性化,减少了参数的个数,更易于工程实现。Huang 等^[15]通过滑模迭代技术来设计误差状态反馈控制律,减少了参数的个数,同时降低了对模型精确度的要求。刘一萌^[16]重点研究了自抗扰控制器的参数优化问题,将遗传算法和粒子群算法应用到自抗扰的参数优化问题中,并且针对粒子群算法早熟问题带来的过早收敛、陷入局部最优等问题采用了标准粒子群算法,在原始粒子群算法中引入惯性权重因子,有效地解决了自抗扰控制器的优化问题。

1.3 其他

廖煜雷等^[17]针对不确定性影响下无人船的艏向控制问题,基于紧格式动态线性化 MFAC 方法提出一种适用于无人船的改进无模型自适应艏向控制方法,无模型控制不考虑无人船数学模型,而是基于系统的输入输出数据进行控制器设计,能够避免复杂的无人船建模环节,最后利用仿真和实船试验证明所提方法的有效性。夏云鹏等^[18]针对无人船存在操舵约束和风浪流扰动下的航向控制问题,设计了一种基于预测函数控制的水面无人船航向控制器,采用先预测后控制的思想,在线求解最优控制量的

过程中充分考虑上述约束与干扰的影响,进而实现对干扰的及时补偿,最后基于一阶野本模型进行了仿真验证。白一鸣等^[19]针对无人船航行中的动态环境特征,提出一种基于动态面控制技术的高效控制算法,动态面控制是在 Backstepping 法的基础上发展起来的,它的提出是为了克服传统反步设计时对虚拟控制求导过程中引起的项数膨胀问题。

航向、航速控制技术相对成熟,无人船可以通过执行机构直接提供推力或者转船力矩完成前进与转向运动。但是舵角与航向、螺旋桨的转速与船速之间的非线性关系以及航向与航速间的耦合关系是需要工程实际应用中进一步思考和解决的问题。

2 欠驱动控制

欠驱动控制包括路径跟踪(path following, PF)与轨迹跟踪(trajjectory tracking, TT)。针对欠驱动控制常用的控制方法有 LOS 引导律、Backstepping 法、Lyapunov 直接法、滑模控制和模型预测控制等。

2.1 基于 LOS 引导律的路径跟踪控制

Line-of-Sight(LOS)引导律能够根据无人船的位置与期望航迹给出期望航向,通过设计控制器跟踪期望航向,进而完成路径跟踪。Li 等^[20]使用了 LOS 引导律、Vector Filed(VF)引导律两种方法进行无人船路径跟踪控制,基本实现了直线路径跟踪与圆弧路径跟踪。Liu 等^[21]提出一种基于路径跟踪误差自适应调整的 LOS 引导律。瞿洋等^[22]在反步法与 Lyapunov 直接法的基础上考虑到横向动力缺失的情况,引入变前视距离的 LOS 引导律处理环境扰动造成的横向漂移运动。此外,在横向控制力无法满足的条件下,提出一种自适应未建模环境力的反步积分控制器,实现了对船舶艏向和前进速度的控制要求。针对未知漂角造成的横向漂移运动,陈霄等^[23]对 LOS 引导律作了进一步的改进,通过引入自适应观测器能够实现漂角的实时估计和补偿,变前视距离的设计使得无人船的操纵更加灵活,最后结合自适应滑模航向控制器有效完成了欠驱动无人船航迹跟踪控制。曾江峰等^[24]针对引导律中的半径设计了一种新型的切换律,能够引导无人船始终以最佳 LOS 圆半径趋向期望路径,同时降低了算法的复杂度。为了提高引导律的收敛速度,朱骋等^[25]提出了一种基于 Mamdai 模型的自适应模糊 LOS 控制策略,通过模糊控制修正 LOS 控制参数,削减了速度与 LOS 引导

律之间的耦合。Caharija 等^[26]针对实际直线航行中存在于时变漂角的情况,在 LOS 引导律中加入积分项,降低漂角带来的影响。

2.2 Backstepping 法

Backstepping 法是一种递归设计方法,其基本思想是将复杂的非线性系统分解成不超过系统阶数的子系统,然后为每个子系统设计部分 Lyapunov 函数和中间虚拟控制量,一直“后退”到整个系统,将它们集成起来完成整个控制律的设计。Jiang^[27]利用 Backstepping 实现了曲线路径跟踪,但是要求艏摇角速度不能为零。为了提高控制器的逻辑性、层次性,关海滨等^[28]将控制系统的设计分为运动环与动力环,基于 Backstepping 法设计虚拟控制律,保证了控制系统的稳定性,完成了直线与圆形轨迹跟踪的仿真验证。Do 等^[29]为了提高 Backstepping 法对参数摄动的鲁棒性,用 Lipschitz 连续投影算法,对模型中的参数进行在线估计,随运动状态不断更新。为了进一步提高控制器的抗扰能力,Do 等^[30]又加入扰动观测器,从而对外界干扰进行估计与补偿。刘丹^[31]将模糊自适应控制加入 Backstepping 法,利用模糊控制逼近无人船自身的非线性干扰项。

2.3 滑模控制

滑模控制(sliding mode control, SMC)也叫变结构控制,本质上是一类特殊的非线性控制,且非线性表现为控制的不连续性。它具有快速响应、对参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识和物理实现简单等优点,在无人船控制中得到了广泛的应用。但是滑模控制存在“抖振”现象,如果“抖振”现象得不到很好的抑制,将加快舵机执行机构的磨损,影响无人船硬件的使用寿命。梁奎^[32]为了降低参数摄动对控制效果的影响,用滑模变结构控制设计了纵向速度跟踪误差一阶指数稳定滑模面与横向速度跟踪误差的滑模面,通过仿真实验验证了滑模控制的有效性。廖煜雷^[33]针对滑模控制的“抖振”问题,在控制器的设计中用饱和函数代替符号函数有效改善了“抖振”现象。朱齐丹等^[34]在保证轨迹跟踪误差收敛的条件下用滑模控制设计了控制器,提高了控制器的鲁棒性。Peng 等^[35]在仅有领头船位置信息可用的情况下,通过滑模控制分别设计纵向控制律与横向控制律,解决了编队控制问题,对动态目标的跟踪有很大的借鉴意义。

2.4 Lyapunov 直接法

Lyapunov 直接法从系统能量的角度给出系统稳定性的判别方法,适用于非线性时变系统、非线性定常系统以及线性时变系统和线性定常系统,应用范围广泛。其基本思想是通过构造 Lyapunov 函数设计控制律使系统渐近稳定,但是对一般的非线性系统仍未找到构造李雅普诺夫函数的通用方法。刘杨等^[36]针对模型参数不确定问题,首先利用微分同胚等效变换和 Lyapunov 直接法设计参考航向和参考速度。分别设计神经网络稳定自适应控制器跟踪参考航向和参考速度。万磊等^[37]针对非完全对称模型,通过两次全局微分同胚变换将系统矩阵变为级联系统的形式。然后基于简化后的模型构建轨迹跟踪误差模型,将轨迹跟踪问题转化为误差的镇定问题,同时基于级联系统理论和 Lyapunov 直接法设计了控制器。

2.5 模型预测控制

模型预测控制通过求解当前时刻的最优解作为控制输入,采用了滚动优化策略,即在线反复进行优化计算,滚动实施,使模型失配、畸变、扰动等引起的不确定性及时得到弥补,从而得到较好的动态控制性能,适合处理时变的无人船控制系统;其次在进行控制器设计时,能够在添加约束的情况下获取最优解,但是这给算法带来很大的计算量,影响系统的快速性。吴青等^[38]建立了无人船运动模型,并基于模型预测控制算法设计了轨迹跟踪控制器,搭建了可视化仿真系统。Liu 等^[39]通过坐标变换找到了系统镇定的等价条件,并将该条件作为模型预测控制器设计的约束条件,从而使系统实现了渐近稳定。Liu 等^[40]继续在模型预测控制的基础上设计了扰动观测器,一定程度上减小了干扰的影响,并且提供更加平滑的控制律。张忠良^[41]基于三自由度数学模型设计了航向预测控制器,并在此基础上通过利用 Serret-Frenet 简化了无人船的路径跟踪数学模型,结合 LOS 引导律完成了路径跟踪仿真验证。柳晨光^[42]为了解决不确定环境下带系统约束的欠驱动 USV 轨迹跟踪问题,分别提出了线性 MPC 与非线性 MPC。通过仿真表明 LMPC 在计算效率上优于 NMPC,而 NMPC 有更高的控制精度。此外,为了解决 USV 运动过程中某些状态参数不可测和干扰不可知的问题提出一种补偿扩张状态观测器,能够无静差地估计不可测状态和干扰,具有较好的控制效果。

在无人船欠驱动航迹跟踪控制方面,LOS 引导

律、Backstepping 法、Lyapunov 直接法、滑模控制和模型预测控制等方法得到了广泛应用。考虑到船舶运动控制系统具有非线性、干扰、不确定性、时变等特点,单纯设计某一种控制律通常很难满足精确航迹跟踪的需求。因此,为了进一步提高控制器的自适应性与抗扰动能力,不同控制方法之间的结合使用也十分常见。

3 海洋环境扰动的处理

无人船运动控制系统的扰动主要来源于模型不确定性与海洋环境扰动。无人船在水中航行时,吃水的深浅、环境的干扰和速度的变化等因素会导致模型参数摄动,其次对模型的简化可能会带来未建模动态的影响。此外,风浪流扰动具有随机性、不确定性,会影响无人船的运动状态,给无人船的运动控制带来很大的困难。对比分析国内外相关研究进展,对扰动的处理与相关控制方法进行归纳总结。

3.1 扰动的建模

无人船在海上工作,复杂多变的海上环境与模型不确定性给无人船的运动控制带来了很大的难度。如果能够通过理论分析准确获取扰动的大小,就能通过输入控制给以补偿。但是建立精确的风浪流的模型是十分困难的,模型不确定性带来的影响也是未知的。因此,研究人员通过对扰动化简建立了能够反映扰动特性的模型。

3.1.1 模型不确定性

模型不确定性表现为模型参数摄动与未建模动态的影响。为了验证参数摄动下控制器的控制性能,由丹丹等^[43]在仿真实验中允许参数有 20%左右的摄动;郑烈心^[44]在一阶响应模型的参数中考虑了速度对参数的影响,一定程度上反映了参数摄动的特性。对未建模动态的处理,通常在模型中等效为未知函数项。

3.1.2 环境扰动模型的建立

郑体强等^[44-45]进行环境扰动建模时,只考虑二阶波浪力的干扰,并且假定为规则波浪;假定风是定常风,不考虑风速变动因素,并且风的作用力可以线性叠加,不考虑耦合作用。视镜等^[46]将海流当作均匀海流处理,并且假定海流主要是在运动学方面对无人船产生作用,引起无人船的漂移运动,而不考虑动力学影响。王雨迪^[12]进一步给出平均风、二阶波浪力在各个自由度上的力与力矩表达式,清晰

的表达了环境扰动对无人船航行姿态的影响。

目前,虽然相关文献中建立了风浪流干扰模型,但是这些模型并没有得到广泛的应用,在设计仿真实验时将风浪流的干扰等效为更为简单的形式加入仿真系统中,例如:白噪声、恒值扰动、正态分布、舵角干扰等。吴恭兴^[47]以恒值扰动与正态随机分布的形式加入系统。隋晓丽^[10]建立了风浪流的扰动模型,但是仿真时以强度为0.5的白噪声作为干扰信号加入系统。黄西密^[7]在仿真验证时,将风浪流的干扰等效为对舵角的干扰,海流等效为 3° 的恒值干扰,风等效为白噪声,海浪用二阶波浪传递函数表示。曾海虹等^[48]给出4种情况下的舵角干扰等效形式,包括周期性风浪流干扰、风浪流正态随机分布干扰、风浪流恒值干扰、风浪流均匀分布综合随机干扰等。

3.2 处理扰动的相关控制方法

为了实现无人船在各种海况下自主作业能力,需要进一步提高控制器的抗干扰能力。目前主要有两种思路:提高控制器自身鲁棒性;通过设计观测器估计扰动的大小。此外,还有一种相对独立的减摇控制方式,用于抑制环境扰动造成的船体横摇,提高恶劣海况下的作业能力。

3.2.1 提高控制器自身鲁棒性

Do等^[29]利用Lipschitz连续投影算法,对模型中的参数进行在线估计,提高了对参数摄动的鲁棒性。段梦霞^[49]采用模糊PID控制,利用模糊控制调节PID参数。Wang等^[50]利用自抗扰控制自身的鲁棒性降低参数摄动的影响,并在参数摄动下进行了仿真验证。张玉喜等^[51]采用了滑模控制,通过设计合适的滑模面,提高了系统对参数摄动和外界干扰的稳定性。

3.2.2 设计扰动观测器

Borhaug等^[52]利用RBF神经网络重新构造了模型中的干扰项,使其包含了模型参数的摄动,通过设计控制律对其进行估计;刘丹^[27]采用模糊系统逼近无人船自身的模型不确定性;Zeng等^[53]用神经网络估计未建模动态与未知参数,通过神经网络最小学习参数法有效的减少了神经网络的计算量。廖煜雷等^[54]采用了Lyapunov直接法对干扰进行了估计。Liu等^[55]结合神经网络与动态表面控制(dynamic surface control, DSC)来观测不确定扰动,简化了控制器的设计。Mu等^[56]同样采用神经网络最小学习参数方法,使计算量减少,能够有效提高算法实用性。

刘陆^[57]针对时变侧滑角未知欠驱动无人船的路径跟踪问题,提出了基于扩张状态观测器的LOS制导方法,采用降维扩张状态观测器估计时变侧滑角,实现了侧滑角的精确估计与补偿,提高了路径跟踪的精确性。应用级联系统稳定性分析证明了闭环系统是输入状态稳定的,并且可以通过调节降维扩张状态观测器的带宽缩短暂态估计过程。

3.2.3 减横摇控制

无人船受到海洋环境的影响会产生各种摇荡,其中以横摇最为显著,影响船上设备的正常工作,船舶受损甚至倾覆沉没。传统的减摇方法主要依靠减摇设备,比如舳龙骨、被动水仓、主动水仓、收方式鳍等辅助设备。但减摇设备要求船体有较大的尺寸,在小型无人船很难添加合适的减摇装置。因此,舵减横摇的一种控制方式被提出,它不需要辅助设备,而是利用流经舵叶两侧的水流对舵叶产生的不同的压力,进而产生力矩;舵减摇利用这一横摇力矩,通过合理的控制使得船舶产生横摇运动,来抵抗或部分抵抗海浪等干扰产生的横摇运动,达到减摇的目的,对小型无人船减横摇有重要意义。

舵减横摇主要存在两个问题,首先减摇与航向控制都是通过控制舵角实现,舵角的变化将对航向产生影响,即减摇与航向控制之间的耦合问题。其次,频繁的操舵会给舵机带来较大的损耗,如何在保证减摇效率的情况下减小操舵幅度与频率也是一个值得研究的问题。高斌^[58]给出了船舶横摇运动的数学模型,设计了基于PID控制算法和状态反馈控制算法的舵减横摇控制系统,为了解决减摇与航向的耦合在系统中加入高通滤波器,通过仿真实验验证了所提方法的有效性。张树豪^[59]系统分析了减摇鳍的工作原理,得到了减摇鳍的各个组成系统的传递函数,基于扩张状态观测器建立减摇鳍的自抗扰控制系统,并应用免疫粒子群算法解决了自抗扰参数设计问题。张文颖等^[60]根据船舶横摇和艏摇运动的非线性方程,用T-S模糊模型对此非线性方程进行了系统建模,基于并行分布补偿原理设计了 H_∞ 模糊控制器,最后通过仿真验证了该方法的有效性。

模型不确定性与环境扰动是影响无人船运动控制的主要因素,国内外学者通常将模型不确定性与环境扰动分别当作系统的内、外扰动处理,其中设计扰动观测器在仿真中有较好的表现,但是观测器的算法比较复杂,工程实用性有待提高。

4 总结与展望

本文从无人船运动控制与扰动处理两个方面出发,对国内外研究进展与主要成果进行了较为全面的综述。此外,国内无人船产业也逐渐兴起,相关领域的科学技术都在蓬勃发展。以珠海云洲智能和安徽科微智能为代表的无人船平台已陆续开始应用于环保监测、科研勘探、水下测绘、搜索救援、安防巡逻乃至军事领域。根据目前可查阅资料显示,大多无人船应用尚处于全远程遥控、半自动化工作,自主程度偏低。其次,为了提高海洋环境下自主作业能力,目前主要采取增大无人船自身体积或者改进船体结构的策略,但是提高同等量级、相同结构无人船的抗扰能力,还需要深入研究环境扰动对无人船运动控制的影响改进控制方法。最后,自主避障由于涉及到环境综合感知、多手段信息融合、路径规划以及运动控制等多方面内容,一直是一个难题。目前,云州已经拥有了自主研发的智能避障技术,而科微在实际应用中稍显不足。自主避障在国内无人船领域仍然是一个挑战,需要在后续的研究中重点突破。总体来说,目前无人船运动控制存在以下亟待解决问题。(1)无人船系统具有非线性、模型不确定性、受风浪流扰动等特性,建模过程中对上述影响因素进行了大量的简化,模型难以准确反映无人船实际运动情况。(2)为了提高控制器的自适应性,智能方法越来越多的被应用于无人船运动控制中,控制效果得到了明显的改善,但同时也增大了算法的时间复杂度,降低了控制系统的实时性。(3)很多控制方法仍停留在仿真阶段,控制方法的实用性有待进一步验证。

无人船运动控制的研究是一项具有挑战性的课题,根据目前无人船运动控制技术的研究现状,笔者认为在未来研究工作中可以从以下两个方面开展深入研究。

4.1 理论研究方面

1) 为了反映实际的无人船操纵情况,应该建立更加精确的数学模型。目前被广泛采用的三自由度数学模型只能反映三个自由度的运动,适合于低速、排水型无人船。随着无人船速度的提高,无人船其余自由度上的运动姿态也会产生大幅度的运动。此时,三自由度模型将无法控制需求,需要建立多自由度的数学模型来反映运动控制所需要的信息。

2) 无人船的运动控制方法需要进一步提高智能

化程度、鲁棒性和自适应性。在传统控制的基础上利用神经网络估计未知扰动是当下的一个研究热点,但是传统神经网络存在收敛速度慢,易陷入局部极小值等缺陷。因此,如何提高神经网络的收敛速度,避免陷入局部极值值得进一步研究。

3) 关于风浪流扰动的处理,需要对海洋环境扰动的模型进行完善,从而更加准确地描述无人船在环境扰动作用下的运动响应。

4) 无人船六自由度的运动特性给无人船的精确建模带来很大的困难,即使建立起精确模型,复杂的模型会增加控制器的设计难度,这也是六自由度模型得不到广泛应用的主要原因。因此,利用数据驱动的无模型控制不失为一种好的选择。

4.2 工程实际方面

1) 工程实际相对于理论研究对模型的要求较低,模型的使用要以控制目标为基础,以充分反映被控对象的状态为原则,选择最合适、有效的模型。在保证所采用模型包含的信息能满足工程要求的前提下,可以根据实际情况进行模型的化简。

2) 控制方法需要提高工程实用性。其中 LOS 引导律简单易懂,在工程应用中得到了研究人员的青睐,但是该引导律只能给出期望航向。在未来的工作中可以对 LOS 引导律进一步改进,使其能够同时提供期望航向与期望航速。

3) 控制方法还要兼顾一定的自适应能力。其中模糊 PID 不需要精确的数学模型,仅通过误差与误差变化率调节控制信号,在工程中得到了广泛应用。但是模糊控制器的参数和控制规则在系统运行时无法在线调整。因此,需要进一步研究具备参数自校正与规则自校正的模糊控制器。

4) 工程问题需要进一步考虑无人船的机械特性,比如输入约束、执行机构迟滞性、舵机零点漂移等问题。只有对上述问题进行深入的考虑与分析,实际航行中才能避免因机械结构问题引起的意外情况的发生。

参考文献:

- [1] Manley J E. Unmanned surface vehicles, 15 years of development[C]//IEEE. Oceans 2008. Quebec City, Canada: IEEE, 2008: 1-4.
 - [2] 廖煜雷, 张铭钧, 董早鹏. 无人艇运动控制方法的回顾与展望[J]. 中国造船, 2014, 55(4): 206-216.
- Liao Yulei, Zhang Mingjun, Dong Zaopeng. Methods of

- motion control for unmanned surface vehicle: State of the art and perspective[J]. *Shipbuilding of China*, 2014, 55(4): 206-216.
- [3] 李永涛. 水面无人艇参数辨识方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
Li Yongtao. Research of USV parameter identification method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [4] 郑烈心. 水面无人艇建模与运动控制系统设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
Zheng Liexin. Modeling and motion control system design of unmanned surface vehicle[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [5] 田勇. 水面无人艇运动控制系统设计与实现[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
Tian Yong. Design and realization of unmanned surface vehicle motion control system[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.
- [6] 高双, 朱齐丹, 李磊. 基于神经网络的高速无人艇模糊 PID 控制[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(4): 776-779.
Gao Shuang, Zhu Qidan, Li Lei. Fuzzy NN control of high-speed unmanned ship[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(4): 776-779.
- [7] 黄西密. 无人艇建模及操纵运动仿真的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
Huang Ximi. Study on unmanned surface vehicle modeling and simulation of manipulation movement[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015.
- [8] 廖煜雷. 无人艇的非线性运动控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
Liao Yulei. Nonlinear motion control methods of unmanned surface vehicle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [9] Miao Runlong, Dong Zaopeng, Wan Lei, et al. Heading control system design for a Mico-USV based on an adaptive expert S-PID algorithm[J]. *Polish Maritime Research*, 2018, 25(2): 6-13.
- [10] 隋晓丽. 水面无人艇航迹控制算法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
Sui Xiaoli. Research on the track control algorithm of unmanned surface vessel[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013.
- [11] 董早鹏. 无人艇运动模糊控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
Dong Zaopeng. Research on motion control of USV based on fuzzy technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [12] 王雨迪. 基于自抗扰控制算法的水面无人艇航向自动舵设计[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
Wang Yudi. Based on auto disturbances rejection control algorithm for heading autopilot of unmanned surface vessel design[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.
- [13] 姜涛. 基于 RBF 神经网络的船舶航向自抗扰控制[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
Jiang Tao. ADRC for ship steering based on RBF neural network[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.
- [14] 李鹏. 基于滑模自抗扰的无人水面艇路径跟踪控制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
Li Peng. Research on path tracking control of unmanned underwater vehicle based on sliding mode auto disturbances rejection control[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.
- [15] Huang Hongyu, Fan Yunsheng. Sliding mode based ADRC for curved path following of unmanned surface vessels[C]//IEEE. 2017 Chinese Automation Congress (CAC). Jinan, China: IEEE, 2017: 4198-4202.
- [16] 刘一萌. 基于自抗扰技术的水面无人艇编队控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
Liu Yimeng. Formation control of unmanned surface vehicle based on active disturbance rejection control[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [17] 廖煜雷, 杜廷朋, 付悦文, 等. 无人艇重定义无模型自适应艏向控制方法与试验[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 1(1): 1-7.
Liao Yulei, Du Tingpeng, Fu Yuewen, et al. The redefined model free adaptive heading control method and experiments of unmanned surface vehicle[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 1(1): 1-7.
- [18] 夏云鹏, 杨田田. 基于预测函数控制的水面无人船航向控制器设计[J]. *舰船电子工程*, 2019, 39(7): 54-59.
Xia Yunpeng, Yang Tiantian. Design of surface unmanned ship heading controller based on predictive function control[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2019, 39(7): 54-59.
- [19] 白一鸣, 赵永生, 邱兵兵. 高效无人艇航向控制器设计[J]. *中国航海*, 2018, 41(4): 67-70.
Bai Yiming, Zhao Yongsheng, Qiu Bingbing. Design of efficient steering controller for unmanned surface vehicle[J]. *Navigation of China*, 2018, 41(4): 67-70.
- [20] Li Zhi, Bachmayer R, Vardy A. Path-following control for unmanned surface vehicles[C]//IEEE. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2017: 4209-4216.
- [21] Liu Tao, Dong Zaopeng, Du Hongwang, et al. Path following control of the underactuated USV based on the improved line-of-sight guidance algorithm[J]. *Polish Maritime Research*, 2017, 24(1): 3-11.
- [22] 瞿洋, 徐海祥, 余文墨. 基于 ILOS 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(5): 834-838.

- Qu Yang, Xu Haixiang, Yu Wenzhao. Integral line-of-sight guidance for path following of underactuated marine surface vessels[J]. *Journal of Wuhan University Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2016, 40(5): 834-838.
- [23] 陈霄, 刘忠, 罗亚松, 等. 海洋环境下欠驱动无人艇航迹跟踪控制算法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(10): 110-117.
Chen Xiao, Liu Zhong, Luo Yasong, et al. Path tracking control algorithm for the underactuated USV in the marine environment[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(10): 110-117.
- [24] 曾江峰, 万磊, 李岳明, 等. 基于切换视线法的欠驱动无人艇鲁棒自适应路径跟踪控制[J]. *兵工学报*, 2018, 39(12): 2427-2437.
Zeng Jiangfeng, Wan Lei, Li Yueming, et al. Switching-line-of-sight-guidance-based robust adaptive path-following control for underactuated unmanned surface vehicles[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(12): 2427-2437.
- [25] 朱骋, 庄佳园, 张磊, 等. 无人水面艇自适应路径跟踪算法[J]. *导航与控制*, 2019, 18(1): 44-50.
Zhu Cheng, Zhuang Jiayuan, Zhang Lei, et al. Adaptive path following algorithm for unmanned surface vehicle[J]. *Navigation and Control*, 2019, 18(1): 44-50.
- [26] Caharija W, Candeloro M, Pettersen K Y, et al. Relative velocity control and integral LOS for path following of underactuated surface vessels[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2012, 45(27): 380-385.
- [27] Jiang Zhongping. Global tracking control of underactuated ships by Lyapunov's direct method[J]. *Automatica*, 2002, 38(2): 301-309.
- [28] 关海滨, 艾娇燕. Backstepping 法在欠驱动无人船航迹跟踪上的仿真研究[J]. *中国科技信息*, 2018(12): 107-111.
Guan Haibin, Ai Jiaoyan. Simulation research on backstepping method for unmanned vehicle trajectory tracking underactuated[J]. *China Science and Technology Information*, 2018(12): 107-111.
- [29] Do K D, Pan J. Robust adaptive path following of underactuated ships[J]. *Automatica*, 2004, 40(6): 929-944.
- [30] Do K D. Practical control of underactuated ships[J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(13): 1111-1119.
- [31] 刘丹. 无人水面艇模糊鲁棒自适应航迹跟踪控制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
Liu Dan. Fuzzy robust adaptive control scheme for trajectory tracking of an unmanned surface vehicle[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.
- [32] 梁奎. 欠驱动无人船航迹跟踪控制研究与仿真[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
Liang Kui. Research and simulation of tracking control for unmanned surface vessels[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [33] 廖煜雷, 庄佳园, 李晔, 等. 欠驱动无人艇航迹跟踪的滑模控制方法[J]. *应用科学学报*, 2011, 29(4): 428-434.
Liao Yulei, Zhuang Jiayuan, Li Ye, et al. Sliding-mode trajectory tracking control for underactuated autonomous surface vehicle[J]. *Journal of Applied Science-Electronics and Information Engineering*, 2011, 29(4): 428-434.
- [34] 朱齐丹, 于瑞亭, 夏桂华. 风浪流干扰及参数不确定欠驱动船舶航迹跟踪的滑模鲁棒控制[J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(7): 959-964.
Zhu Qidan, Yu Ruiting, Xia Guihua. Sliding-mode robust tracking control for underactuated surface vessels with parameter uncertainties and external disturbances[J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(7): 959-964.
- [35] Peng Zhouhua, Wang Dan, Chen Zhiyong, et al. Adaptive dynamic surface control for formations of autonomous surface vehicles with uncertain dynamics[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(2): 513-520.
- [36] 刘杨, 郭晨, 沈智鹏. 欠驱动船舶路径跟踪的神经网络稳定自适应控制[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(2): 169-174.
Liu Yang, Guo Chen, Shen Zhipeng. Stable adaptive neural network control of path following for underactuated ships[J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(2): 169-174.
- [37] 万磊, 董早鹏, 李岳明. 非完全对称欠驱动高速无人艇航迹跟踪控制[J]. *电机与控制学报*, 2014, 18(10): 95-103.
Wan Lei, Dong Zaopeng, Li Yueming. Trajectory tracking control of incomplete symmetry underactuated USV at high speed[J]. *Electric Machines and Control*, 2014, 18(10): 95-103.
- [38] 吴青, 王乐, 柳晨光. 基于 MPC 的无人船运动控制及可视化仿真系统实现[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2016, 40(2): 245-250.
Wu Qing, Wang Le, Liu Chenguang. Motion control and visual simulation system of unmanned surface vessel based on the model predictive control[J]. *Journal of Wuhan University Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2016, 40(2): 245-250.
- [39] Liu Zhilin, Yu Ruiting, Zhu Qidan. Model predictive control of underactuated surface vessel with invariant manifolds constraints[C]//IEEE. 8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Jinan, China: IEEE, 2010: 785-790.
- [40] Liu Zhilin, Geng Chao, Zhang Jun. Model predictive controller design with disturbance observer for path

- following of unmanned surface vessel[C]//IEEE. 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Takamatsu, Japan: IEEE, 2017: 1827-1832.
- [41] 张忠良. 无人水面艇路径跟踪控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
Zhang Zhongliang. Research on the path following control of unmanned surface vessel[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [42] 柳晨光. 基于预测控制的无人船运动控制方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
Liu Chenguang. Motion control of unmanned surface vehicles based on model predictive control[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [43] 由丹丹, 廖煜雷, 董早鹏. 喷水推进无人艇航向的鲁棒 S 面控制方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(S1): 152-156.
You Dandan, Liao Yulei, Dong Zaopeng. Robust S surface method for course control of USV with water-jet propulsion[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(S1): 152-156.
- [44] 郑体强, 王建华, 赵梦铠, 等. 波浪干扰下固定双桨无人水面艇的路径跟踪方法[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(1): 75-78.
Zheng Tiqiang, Wang Jianhua, Zhao Mengkai, et al. Path tracking method of unmanned surface vehicle with two fixed propellers under wave disturbance[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(1): 75-78.
- [45] 郑体强, 王建华, 赵梦铠, 等. 风干扰下基于变船长比的无人水面艇路径跟踪方法[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(3): 163-167.
Zheng Tiqiang, Wang Jianhua, Zhao Mengkai, et al. Path following method of unmanned surface vehicle based on variable ship length rate under the wind interference[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(3): 163-167.
- [46] 祝镜, 王建华, 赵梦铠, 等. 关于无人水面艇路径跟踪优化控制仿真[J]. 计算机仿真, 2016, 33(6): 362-367.
Zhu Jing, Wang Jianhua, Zhao Mengkai, et al. Simulation of path following optimization control of unmanned surface vehicle[J]. Computer Simulation, 2016, 33(6): 362-367.
- [47] 吴恭兴. 无人艇操纵性与智能控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
Wu Gongxing. Research on the maneuverability and intelligent control technology of unmanned surface vehicle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [48] 曾海虹, 李向军, 丁丽娜, 等. 风浪流干扰下的无人艇航向模糊自适应模型的研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(4): 27-30.
Zeng Haihong, Li Xiangjun, Ding Lina, et al. Fuzzy adaptive model for unmanned surface vessel course under the interfering of wind and wave based on Nomoto model[J]. Ship Electronic Engineering, 2018, 38(4): 27-30.
- [49] 段梦霞. 基于模糊 PID 控制的无人船舵机控制系统研究[D]. 海口: 海南大学, 2017.
Duan Mengxia. The study of srrov control system for unmanned surface vehicle based on fuzzy PID control[D]. Haikou: Hainan University, 2017.
- [50] Wang Changshun, Zhang Huang, You Yu. USV trajectory tracking control system based on ADRC[C]// IEEE. 2017 Chinese Automation Congress. Jinan, China: IEEE, 2017: 7534-7538.
- [51] 张玉喜, 孙大铭, 徐海军, 等. 船舶航向自动保持控制及设计[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(10): 64-66.
Zhang Yuxi, Sun Daming, Xu Haijun, et al. Ship course-keeping control and design[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(10): 64-66.
- [52] Borhaug E, Pavlov A, Pettersen K Y. Integral LOS control for path following of underactuated marine surface vessels in the presence of constant ocean currents[C]//IEEE. 2008 47th IEEE Conference on Decision & Control (47). Cancun, Mexico: IEEE, 2008: 4984-4991.
- [53] Zeng Jiangfeng, Wan Lei, Li Yueming, et al. Robust composite neural dynamic surface control for the path following of unmanned marine surface vessels with unknown disturbance[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2018, 15(4): 1-14.
- [54] 廖煜雷, 庞永杰, 庄佳园. 喷水推进型无人艇航向跟踪的反步自适应滑模控制[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(1): 82-84.
Liao Yulei, Pang Yongjie, Zhuang Jiayuan. Backstepping adaptive sliding mode control for unmanned surface vessel course tracking with water-jet-propelled[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(1): 82-84.
- [55] Liu Lu, Wang Dan, Peng Zhouhua. Path following of marine surface vehicles with dynamical uncertainty and time-varying ocean disturbances[J]. Neurocomputing, 2016, 173: 799-808.
- [56] Mu Dongdong, Wang Guofeng, Fan Yunsheng, et al. Adaptive trajectory tracking control for underactuated unmanned surface vehicle subject to unknown dynamics and time-varying disturbances[J]. Applied Science, 2018, 574(8): 1-16.
- [57] 刘陆. 欠驱动无人船的路径跟踪与协同控制[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
Liu Lu. Path following and cooperative control of underactuated unmanned surface vehicles[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018.
- [58] 高斌. 舵减横摇系统分析与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.

- Gao Bin. Rudder roll stabilization system analyse and design[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [59] 张树豪. 基于自抗扰控制的船舶横摇控制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- Zhang Shuhao. Ship rolling control based on active disturbance rejection control[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013.
- [60] 张文颖, 彭秀艳. 基于 T-S 模糊模型的船舶舵减横摇 H_∞ 状态反馈控制[J]. 船舶工程, 2013, 35(5): 51-54.
- Zhang Wenying, Peng Xiuyan. H_∞ State-feedback control for ship rudder roll damping system based on T-S fuzzy model[J]. Ship Engineering, 2013, 35(5): 51-54.

Overview of unmanned surface vehicle motion control methods

PEI Zhi-yuan¹, DAI Yong-shou¹, LI Li-gang¹, JIN Jiu-cai², SHAO Feng¹

(1. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Received: Jun. 11, 2019

Key words: unmanned surface vehicles; motion control; model uncertainty; environmental disturbance management

Abstract: To realize the autonomous operation of unmanned surface vehicles (USVs) at sea, the rapidity, accuracy, and robustness of USV motion control need to be improved urgently. First, from the angle of full drive control and underactuated control, the main control methods of course control, speed control, track tracking control, and path tracking control are summarized. Second, the research progress of dealing with uncertain disturbance in marine environments is described, including the mainstream methods of disturbance modeling and disturbance elimination and suppression. Finally, the present situation and existing problems of USV motion control are outlined, and future research directions are proposed from the perspectives of engineering application and theoretical research.

(本文编辑: 刘珊珊)