

# 自抗扰技术在仿生减阻型水下航行器 深度控制的应用研究

吕 达<sup>1</sup>, 苏浩秦<sup>1</sup>, 张子俊<sup>1</sup>, 郭明禹<sup>1</sup>, 王奥博<sup>2</sup>

(1. 中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074; 2. 清华大学, 北京 100084)

**摘要:**提出了一种基于自抗扰技术的深度控制律,通过在 Simulink 中建立仿生减阻型水下航行器的动力学模型和自抗扰控制器的模型进行仿真试验,显示了该自抗扰控制律可以抑制扰动给深度控制的影响,经过合理调参,自抗扰控制律可以快速、稳定且以较小超调控制水下航行器深度的变化。该控制律满足了某型号仿生减阻型水下航行器的运动控制升级需求,能够提高其机动性及抗扰动能力。

**关键词:**自抗扰;水下航行器;控制律;扰动

**本文引用格式:**吕达,苏浩秦,张子俊,等.自抗扰技术在仿生减阻型水下航行器深度控制的应用研究[J].兵器装备工程学报,2020,41(S1):154-158.

**Citation format:**LYU Da, SU Haoqin, ZHANG Zijun, et al. Application of Active Disturbance Rejection Technology in Depth Control of AUV[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(S1): 154-158.

中图分类号: TP13

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2020)S1-0154-05

## Application of Active Disturbance Rejection Technology in Depth Control of AUV

LYU Da<sup>1</sup>, SU Haoqin<sup>1</sup>, ZHANG Zijun<sup>1</sup>, GUO Mingyu<sup>1</sup>, WANG Aobo<sup>2</sup>

(1. China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China;

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to improve the maneuverability and working efficiency of the Bionic Drag-Reduction AUV, a depth control law based on ADRC was proposed. The ADRC control law is similar to the PID control law, which is widely used and model-independent. And it improves the control effect for disturbance in actual application. The simulation test was carried out by establishing the dynamic model of the Bionic Drag-Reduction AUV and the model of ADRC controller. The test results show that the ADRC control law can well suppress the effect of disturbance on depth control. The ADRC controller can control the change of the depth with a small overshoot quickly and stably by reasonable adjustment of control parameters. The control law satisfies the requirements of motion control upgrade of the Bionic Drag-Reduction AUV and can greatly improve its maneuverability and anti-disturbance capability.

**Key words:** ADRC; AUV; simulation; control law; disturbance

水下航行器深度控制是保障水下航行器水面以下航行及作业的重要技术。水下航行器深度控制主要包括下潜、上浮及保持深度三个部分<sup>[1-4]</sup>。目前水下航行器深度控制器

研发所存在的主要难点在于下潜及上浮速度慢,效率不高,严重影响水下航行器的机动性,降低其作战或作业效能;深度保持不稳定,易受水下暗流及其他扰动影响,造成水下航

收稿日期:2020-01-07;修回日期:2020-02-15

基金项目:集团研发类项目(8000090003014160021)

作者简介:吕达(1994—),男,硕士,助理工程师,主要从事水下航行器研发,E-mail:2442070076@qq.com。

行器坐底或者碰撞,从而产生不必要的损失。故如何更快速、稳定地控制水下航行器的深度是水下航行器控制系统研究的重要方向。

某型号仿生减阻型水下航行器是一种具备多种作业能力的轻型海洋试验平台,其具有仿生外形,可搭载多种不同的载荷实现其不同功能。目前该型水下航行器已顺利经过十余次海洋或湖泊性能测试,验证了其技术的可靠性和成熟性。该航行器具有总重量轻、搭载能力强、航行阻力小、功耗低、机动灵活的特点,是一种高性价比的综合海洋试验平台。

## 1 自抗扰深度控制律设计

根据水下航行器深度控制器的研发需求,对某型号仿生减阻型水下航行器设计了自抗扰深度控制系统。自抗扰控制(ADRC)技术是已故研究员韩京清<sup>[16]</sup>于1999年正式提出的,旨在改进传统PID控制系统在实际使用情况下由于扰动而不能达到理想效果的缺点。其具体组成为三大模块:跟踪微分器、扩张状态观测器和状态误差反馈控制律。自抗扰控制适用范围广,具有模型无关性,对黑箱模型、灰箱模型和白箱模型均具有良好的适用性;且反应敏捷,状态观测器可将观测到的扰动第一时间补偿到输出端,而传统的PID控制要等到误差发生以后才能去补偿控制;自抗扰控制具有较高的灵活性,一般PID适用的情景,自抗扰控制都可很好的替代。

根据自抗扰控制器的定义和基本组成,结合仿生减阻型水下航行器的驱动特点,设计出其深度控制律如下。由于该型水下航行器深度方向由水平舵控制,控制律控制的对象应为水平舵的舵角 $\delta e$ 。采用内外环嵌套结构,内环为姿态控制,外环为深度控制,外环的输出信号作为内环俯仰角的期望信号。其中,内环采用经典PID控制,内环控制律为式(1)。 $ksita\_p$ 、 $ksita\_i$ 、 $kwz\_p$ 为内环的3个PID参数, $e\_wz$ 为俯仰角速度的误差, $e\_sita$ 为俯仰角的误差, $e\_y$ 为深度的误差。

$$\begin{aligned} \delta e(k) = & \delta e(k-1) + ksita\_p \cdot \\ & (e\_sita(k) - e\_sita(k-1)) + \\ & ksita\_i \cdot e\_sita(k) + kwz\_p \cdot \\ & (e\_wz(k) - e\_wz(k-1)) \end{aligned} \quad (1)$$

$$e\_sita(k) = SITA(k) + sita(k) = SITA(k) + u_0(k) - \frac{z_3(k)}{b} \quad (2)$$

外环采用自抗扰控制,其状态误差反馈控制律为式(3),其中 $kp$ 、 $kd$ 皆为常数。 $e_1$ 和 $e_2$ 为跟踪微分器和扩张状态观测器共同决定,其表达式为式(4)。扩张状态观测器由式(5)决定,扩张状态观测器将影响被控对象的扰动扩张成新的状态变量 $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$ ,且由式(5)可以得出状态变量 $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$ 。跟踪微分器的表达式为式(6),由跟踪微分器可以提取深度期望信号的估计 $v_1$ 和微分 $v_2$ ,其中最速控制综合函数

$fhan(x_1, x_2, x_3, x_4)$ 的具体形式为式(7),式(7)中各参数意义如式(8)、式(9)所示。状态误差反馈控制律根据跟踪微分器提取的深度期望信号和深度期望信号的微分与状态观测器观测到的系统输出和输出的导数的误差进行控制和扰动补偿。

$$u_0(k) = kp \cdot e_1(k) + kd \cdot e_2(k) \quad (3)$$

$$e_1(k) = v_1(k) - z_1(k) \quad e_2(k) = v_2(k) - z_2(k) \quad (4)$$

$$e(k) = z_1(k) - y(k)$$

$$z_1(k+1) = z_1(k) + h \cdot [z_2(k) - \beta_{01} \cdot e(k)] \quad (5)$$

$$z_2(k+1) = z_2(k) + h \cdot [z_3(k) - \beta_{02} \cdot e(k) + b \cdot sita(k)]$$

$$z_3(k+1) = z_3(k) - h \cdot \beta_{03} \cdot e(k)$$

$$v_1(k+1) - v_1(k) = h \cdot v_2(k)$$

$$v_2(k+1) - v_2(k) = h \cdot fhan(v_1(k) - Y(k), v_2(k), r, h) \quad (6)$$

$$fhan(x_1, x_2, r, H) = \begin{cases} -r \cdot \frac{a}{d} & |a| \leq d \\ -r \cdot \text{sign}(a) & |a| > d \end{cases} \quad (7)$$

其中有:

$$d = r \cdot H; d_0 = d \cdot H \quad (8)$$

$$y = x_1 + H \cdot x_2; a_0 = \sqrt{d^2 + 8 \cdot r \cdot |y|}$$

$$a = \begin{cases} x_2 + \frac{y}{H} & |y| \leq d_0 \\ x_2 + \frac{\text{sign}(y) \cdot (a_0 - d)}{2} & |y| > d_0 \end{cases} \quad (9)$$

经过合理调参可得控制律中各项控制参数的合理取值,其中各项控制参数的取值如表1所示。

表1 自抗扰控制律各项控制参数

控制参数	取值	控制参数	取值
$kwz\_p$	1	$h$	0.01
$ksita\_p$	1	$r$	20
$ksita\_i$	0	$H$	2
$ky\_p$	-0.000 1	$\beta_{01}$	3
$ky\_d$	-0.02	$\beta_{02}$	3
$b$	35	$\beta_{03}$	3

## 2 纵向运动动力学模型建立

根据上一小节中设计的深度控制律,在Simulink中建立该型号仿生减阻型水下航行器的动力学模型<sup>[5-10]</sup>以及深度自抗扰控制器模型<sup>[9]</sup>。深度自抗扰控制器模型如图1所示。



### 3 深度控制仿真试验

下面通过几个场景的仿真来说明该深度控制算法的有效性。考虑如下情形,某一时刻,该仿生减阻型水下航行器在 200 m 水深处航行,在 10 s 后收到指令将自身所处的深度改变为 180 m,随后保持深度为 180 m 继续航行,整个仿真试验过程持续 100 s,仿真采用固定步长为 1 ms,并且选用 Runge-Kutta 方法。

图 3 为该仿生减阻型水下航行器上浮改变深度过程的深度曲线。由图中曲线可看出,该水下航行器在两段深度保持过程中,能稳定地将深度分别保持在 200 m 和 180 m;且在上浮指令后,能快速响应,整个上浮过程在 25 s 之内深度即可到达距期望深度 0.5 m 之内,且超调最大不过 1 m,小于深度改变量的 5%。由此可见,该控制律能快速、稳定控制该水下航行器深度的保持及变化。

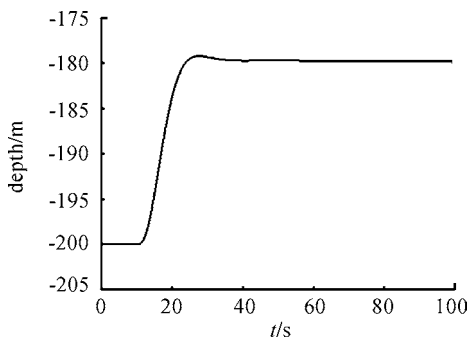


图 3 水下航行器自抗扰控制深度曲线

继续考虑仿真试验在该水下航行器深度保持及变化过程中的姿态方面的控制效果,图 4 为该仿生减阻型水下航行器上浮改变深度过程的俯仰角曲线。由图中曲线可以看出,该水下航行器在两段深度保持的过程中姿态角稳定在  $0^\circ$ ;在上浮指令后,快速将俯仰角调整为正值,利用水下航行器轴向速度上浮,上浮到 180 m 深度后俯仰角最终调整到 0,整个上浮过程俯仰角的最大值为  $14^\circ$ ,整个调整过程大约为 30 s,与深度仿真得到的结果相吻合。

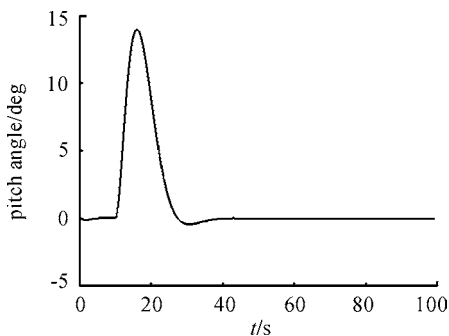


图 4 水下航行器自抗扰控制俯仰角曲线

保持过程中对其姿态的控制取得较好的效果。

下面继续考虑该水下航行器受到外界扰动的深度保持及变化过程。与第一种情形类似,且在全过程中加入深度方向的扰动,某一时刻,该仿生减阻型水下航行器在 200 m 水深处航行,在 10 s 后收到指令将自身所处的深度改变为 180 m,随后保持深度为 180 m 继续航行,整个仿真试验过程持续 100 s,仿真采用固定步长为 1 ms,并且选用 Runge-Kutta 方法。

图 5 为该仿生减阻型水下航行器在深度方向受到扰动时上浮改变深度过程的深度曲线。由图中曲线可看出,该水下航行器的深度在 180 m 和 200 m 处,虽然由于扰动的影响,其深度发生一定震荡变化,但其深度无论在变化前还是变化后都能稳定保持在期望深度附近。

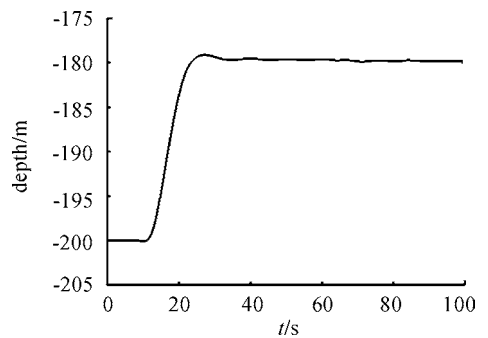


图 5 水下航行器自抗扰控制在扰动下深度曲线

图 6 为在零时刻后 35 s 该水下航行器实际深度与期望深度的误差曲线,由图中曲线可看出,水下航行器在上浮动作稳定之后,水下航行器的实际深度与期望深度的误差在 0.5 m 范围之内。由此可见,该控制律能在水下航行器深度方向受到扰动时快速、稳定控制其深度。

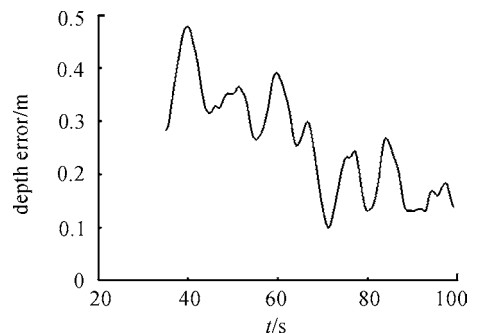


图 6 水下航行器深度调整完成后实际深度与期望深度的误差曲线

类似地,考虑受扰动情况下姿态的控制效果,图 7 为该仿生减阻型水下航行器受扰动上浮改变深度过程的俯仰角曲线。由图可知,该水下航行器受到扰动的影响,但其在深度保持过程中姿态角能保持在  $0^\circ$  左右;且在上浮指令后,快速将俯仰角调整为正值,利用水下航行器自身速度快速上浮,上浮到 180 m 深度后俯仰角最终调整到  $0^\circ$  左右,整个上

由此可以得到,该控制律在水下航行器深度调整变化及

浮过程俯仰角的最大值为 14 度, 整个调整过程大约为 25 s, 且在深度调整完成后, 水下航行器的实际俯仰角与期望的误差在  $0.4^\circ$  之内。

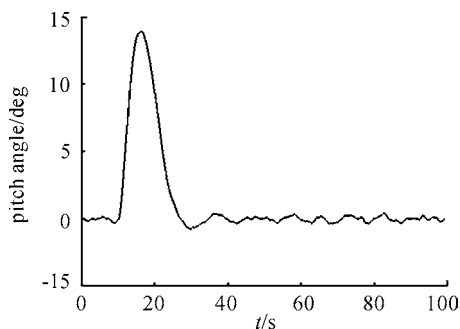


图 7 水下航行器自抗扰控制在扰动下俯仰角曲线

图 8 为水下航行器在零时刻后 35 s 即深度调整完成后姿态角误差曲线, 可以看出, 水下航行器的实际俯仰角与期望的误差在  $0.4^\circ$  范围之内。由此可以得到, 该控制律在水下航行器深度方向受到扰动时, 深度调整变化及保持过程中对其姿态的控制能够取得较好的效果。

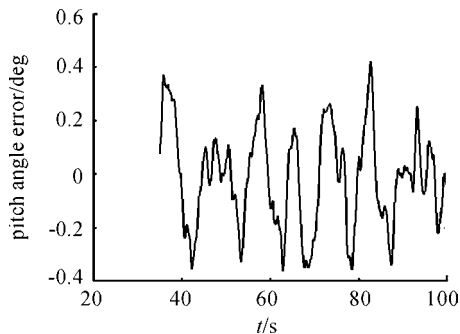


图 8 水下航行器深度调整完成后实际俯仰角与期望俯仰角的误差曲线

## 4 结论

1) 提出了一种基于自抗扰技术的仿生减阻型水下航行器深度控制方法, 并通过仿真验证了该方法的有效性。

2) 这种控制方法能够快速稳定地控制水下航行器的深度及深度变化, 其控制精度高、输出误差小, 能够很好地抑制扰动带来的不利影响, 将深度及俯仰角误差抑制在较小范围内。

3) 这种控制方法能够为该型号仿生减阻型水下航行器的控制系统技术升级提供有效的技术支持。

## 参考文献:

- [1] 王芳. 欠驱动 AUV 的运动控制技术综述[J]. 中国造船, 2010, 51(2): 227-241.
- [2] 曾俊宝. 便携式自主水下机器人控制系统研究与应用[J]. 机器人, 2016, 38(1): 91-97.
- [3] 赵昊广. 新型自主水下航行器的运动控制研究与应用[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(12): 48-52.
- [4] 郑智林. 舰船机动中拖曳系统建模与定深控制研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(4): 106-110.
- [5] 赵德会. AUV 控制系统试验平台[J]. 船舶工程, 2005, 27(3): 38-42.
- [6] 周焕银. 基于 AUV 垂直面运动控制的状态增减多模型切换[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(8): 1309-1315.
- [7] 张勋. AUV 均衡系统设计及垂直面运动控制研究[J]. 中国造船, 2012, 53(1): 28-36.
- [8] 赵文德. 基于浮力调节的 AUV 升沉运动控制技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(4): 411-417.
- [9] 施小成. 基于自抗扰方法的 UUV 近水面垂直面运动控制[J]. 鱼雷技术, 2011, 19(3): 209-213.
- [10] 路引. 某型无人机全机仿真平台设计[J]. 兵器装备工程学报, 2015, 36(5): 123-126.
- [11] 李岳明. 多功能自主式水下机器人运动控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [12] 袁德祥. 基于自抗扰控制技术的 AUV 运动控制的研究与仿真[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [13] 陈江. AUV 垂直面运动控制过程中自抗扰方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [14] 袁昌斌. 多推进器 AUV 的分布式并行运动控制[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [15] 姜春萌. 自主水下机器人智能控制与参数优化技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [16] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [17] 王洪斌. 基于粒子群优化的 AUV 定深跟踪有限时间控制[C]//第 37 届中国控制会议论文集. 中国自动化学会控制理论专业委员会, 武汉: 2018.

(责任编辑 杨梅梅)