

DOI: 10.7641/CTA.2018.70200

# 过渡目标值的非线性PID对自治水下机器人变深运动的稳定控制

马艳彤<sup>1,2</sup>, 郑荣<sup>1†</sup>, 于闯<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;

2. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 针对传统PID在控制自治水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)变深运动时易出现超调、大幅波动等问题, 提出一种具有过渡目标值过程来调节误差反馈的非线性PID控制器. 在分析传统PID控制下系统出现超调原因的基础上, 对系统目标值安排过渡过程, 利用系统输出跟踪过渡后的目标值进行误差反馈控制. 通过赫尔维兹判据证明了系统稳定性, 仿真验证了控制的可行性. 最后通过湖上试验验证其工程可行性与实用性, 得出在非线性的过渡目标值的PID控制下, 系统的动态响应特性得以优化, 变深超调和波动问题明显改善, 可实现AUV平稳地变深运动控制.

**关键词:** 自治水下机器人; 阶跃变深; 非线性过渡函数; 系统稳定性; 非线性PID

**引用格式:** 马艳彤, 郑荣, 于闯. 过渡目标值的非线性PID对自治水下机器人变深运动的稳定控制. 控制理论与应用, 2018, 35(8): 1120 – 1125

中图分类号: TP273 文献标识码: A

## Autonomous underwater vehicle deepening control based on transiting target value nonlinear PID

MA Yan-tong<sup>1,2</sup>, ZHENG Rong<sup>1†</sup>, YU Chuang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China;

2. School of mechanical engineering and automation northeastern university, Shenyang Liaoning 110819, China)

**Abstract:** The traditional depth control for autonomous underwater vehicle (AUV) based on the traditional PID method has drawbacks such as overshooting and large fluctuation. To overcome these problems, a nonlinear PID controller with transiting target value process for error adjustment is proposed in this paper. The mechanism behind the overshooting for traditional PID control method is analyzed. Based on this, a series of transitional targets are designed between the current state and the desired state. These transitional targets are fed to the proposed controller for feedback control. The stability of this controller is analyzed using Louth criterion. And the feasibility is validated through Matlab simulation. Lake experiment was also conducted to test its performance in field missions. The experiment results showed the overshooting and fluctuation problems are significantly reduced using the proposed controller. The dynamic response of the system is enhanced and the depth of the vehicle can be changed smoothly.

**Key words:** autonomous underwater vehicle; step-deepening motion; nonlinear transition function; system stability; nonlinear PID

**Citation:** MA Yantong, ZHENG Rong, YU Chuang. Autonomous underwater vehicle deepening control based on transiting target value nonlinear PID. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(8): 1120 – 1125

## 1 引言(Introduction)

随着自治水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)技术的不断成熟, 其在海洋领域发挥着越来越重要的作用<sup>[1]</sup>. AUV在水下航行需做变深运动以

到达指定工作深度; 在进行海底勘查与测绘时, 由于海底地貌的多变性, 地形跟踪尤为复杂, 且搭载的多波束侧扫声纳对海底高度有一定要求, 这些都对AUV在变深运动时的稳定性提出了更高的要求. 对于大中

收稿日期: 2017-03-27; 录用日期: 2018-02-26.

†通信作者. E-mail: zhengr@sia.cn; Tel.: +86 13609896800.

本文责任编辑: 吴敏.

水下巡航系统(XDA13030294), 中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助.

Supported by the Underwater Cruise System (XDA13030294) and the Strategic Pilot Science and Technology Project of Chinese Academy of Science (Class A).

型AUV来说,其尺寸和重量较大,运动中存在较多约束条件,使得其具有明显的大惯性、长时滞特性<sup>[2]</sup>.因此,变深运动时易出现控制超调的情况,且变深时受扰动较大,易产生震荡.因此,研究AUV的变深航行控制更具实际意义.

随着控制技术的不断发展,多种智能算法被用于AUV的航行控制中,如神经网络、模糊控制、自适应控制等多种智能控制技术<sup>[3-6]</sup>.但智能控制对运动模型及其参数均有所假定与边界限制,针对性和局限性较强,还未在工程实际应用中得到普及<sup>[7-8]</sup>.

传统的PID控制算法由于原理简单,适用性强,使用方便,在控制中得到广泛的应用.在工程领域,AUV的航行控制大多采用PID控制算法<sup>[9-10]</sup>.对于简单的PID控制器,P,I,D参数一经整定,在整个过程中便一直保持不变.这种控制器很难同时满足跟踪设定值和适应过程特性变化的要求,由此带来了快速性和超调量之间的矛盾<sup>[11-12]</sup>.对于大中型AUV来说,这种控制缺陷表现得尤为明显.

对此,研究学者提出多种对PID的改进算法.文献[13-14]针对非线性多输入多输出系统下的PID参数整定问题,提出自适应模糊PID控制,用于AUV运动模型的建模与航行控制,提高了AUV系统的动态特性,而且可在参数摄动和外界扰动时获得较好的控制性能.文献[15-16]针对AUV模型的复杂性和航行时存在海流干扰等问题,提出遗传算法PID控制技术,以提高AUV运动控制的精确性、鲁棒性和稳定性.熊华胜,边信黔等人提出积分变结构控制算法,用于AUV的航向控制,规避了AUV数学模型的不精确和外界非线性扰动问题<sup>[17]</sup>.文献[8]在AUV航向运动线性数学模型基础上,设计了双闭环变速积分PID控制器,对PID控制器中积分项进行“变速”处理,从而改善超调问题,提高系统稳定性.文献[18]提出深度误差和纵倾角耦合处理的PID控制方法,用于AUV定深/高的稳定航行.以上这些改进的PID控制算法的提出可解决AUV模型复杂、非线性严重、PID参数难以调节等问题,由此提高动态响应精度、鲁棒性、稳定性.可以说,这些算法亦是解决AUV模型复杂度来实现精确控制的.

本文将另辟蹊径,正视AUV模型复杂、PID参数整定困难的问题,而从输入的控制目标值入手,与控制模型本身并无关系.采用对目标值安排非线性过渡函数,并与传统PID控制器级联起来构成非线性PID控制器,以期改善AUV在接近目标深度时易出现超调、震荡的问题.

从工程实际角度出发,控制系统下达控制指令到驱动系统到达目标值是一个“渐变”的过程.因此,本文设定:在变深初期,采用传统PID控制方法,以实现最大能力的动态调整,在达到距目标值一定深度后,

为防止PID控制下的超调,对深度值安排过渡过程,以缓冲其误差变化量对输出的影响.因此,在原有的PID控制框架下对输入值增加非线性过渡函数,以此构成非线性PID控制器,最终实现变深稳定控制.

## 2 AUV的深度运动数学模型(The mathematical model of AUV vertical motion)

由于水下机器人的运动十分复杂,为了简化问题,这里假设:若AUV做变深运动时只改变深度,不改变航向,且忽略AUV的横滚运动,即垂直面和水平面无耦合影响<sup>[19]</sup>.在这种情况下对其进行深度运动模型的建立.首先,建立AUV垂直面运动坐标系,如图1所示.其中: $E-\xi\zeta$ 为固定坐标系, $G-xyz$ 为运动坐标系.

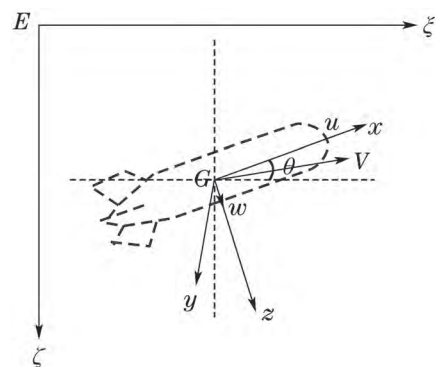


图1 AUV垂直面运动坐标系

Fig. 1 AUV vertical motion coordinate system

现将运动坐标系原点取在AUV重心处,在平衡冲角和舵角的条件下,AUV做定常直线运动的线性化数学方程可表示为

$$\begin{cases} (m - Z_{w'})\dot{w} - Z_{q'}\dot{q} - (mV + Z_q)q - Z_w w = T_z, \\ (I_y - M_{q'})\dot{q} - M_w \dot{w} - M_q q - M_w w = M_{T_z}, \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $m$ 为AUV的质量; $I_y$ 为绕 $y$ 轴的惯性矩; $w$ 为沿 $z$ 轴的速度, $w = \dot{z}$ ; $q$ 为纵倾角速度 $q = \dot{\theta}$ ; $V$ 为航行体速度. $Z_{w'}$ , $Z_{q'}$ , $Z_q$ , $Z_w$ , $M_{q'}$ , $M_w$ , $M_q$ , $M_w$ 为AUV的水动力参数; $T_z = Z_{\delta_e}\delta_e$ , $M_{T_z} = M_{\delta_e}\delta_e - mgh\theta$ ,分别为沿 $Z$ 轴的推力和推力矩,此处 $\delta_e$ 为水平舵角.

一般情况下 $\theta$ 为较小量,即可假定: $\sin \theta = \theta$ , $Z_{q'}$ , $M_{q'}$ , $M_w$ 较小,可忽略.经整理可得AUV深度运动的传递函数表达式为

$$G(s) = \frac{z}{\delta_e} = \frac{Z_{\delta_e} V (I_y s^2 - M_q s + mgh)}{A_3 s^4 + A_2 s^3 + A_1 s^2 + A_0 s}, \quad (2)$$

在式(2)中, $A_0$ , $A_1$ , $A_2$ , $A_3$ 分别表示如下:

$$\begin{cases} A_0 = -mghZ_w, \\ A_1 = M_q Z_w + mgh(m - Z_w) - M_w(mV + Z_q), \\ A_2 = -M_q(m - Z_w) - I_y Z_{w'}, \\ A_3 = I_y(m - Z_{w'}). \end{cases} \quad (3)$$

### 3 变深控制器设计(The design of deepening motion controller)

#### 3.1 控制问题描述(Control problem formulation)

基于误差反馈来消除误差是PID的精髓,但直接取目标值与实际行为之间的误差并不是完全合理的.主要体现在被控对象的输出是动态环节的输出,存在惯性,其变化是不可能跳变的,而目标设定值是可以跳变的<sup>[20]</sup>.它们之间的误差在跳变瞬间会“骤增”,这样极易造成系统的超调.这也正是AUV做变深运动时面临的控制技术难题.

因此,提出在被控对象的能力所能承受的范围内根据控制目标,增加一个合适的过渡过程,使系统的实际行为跟踪过渡好的目标值,在此基础上再进行误差反馈调节,来最终达到控制目标.这里借鉴文献[20]中提到的对目标值安排过渡过程函数调节误差反馈e的思想,用该函数计算的目标值作用到比例-积分-微分调节中,以此构成如图2所示的过渡目标值函数的PID控制器.

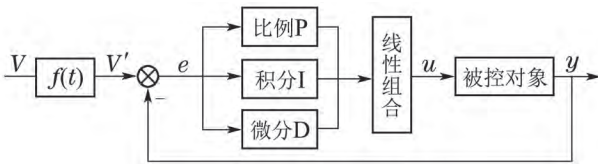


图2 对目标值安排过渡函数的控制框图

Fig. 2 The control block of the transition to the target value

该控制器保留了传统PID“用误差反馈来消除误差”的思想精髓,在其基础上为控制目标值的跳变安排过渡过程函数f(t),再令系统输出y跟踪过渡后的目标值V'.

#### 3.2 控制器设计(Controller design)

实际工程中,由于AUV具有惯性大、动态响应慢等问题,导致其在变深运动时易出现的超调现象.对此,本文借鉴文献[20]中通过过渡函数来调目标值,以此改变反馈误差量的思想,提出过渡目标值的非线性PID控制算法,具体控制框图如图3所示.

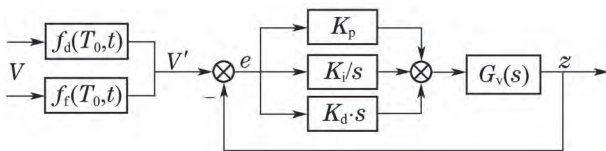


图3 AUV深度控制系统框图

Fig. 3 The block diagram of AUV depth control system

图中,V为目标深度,V'为过渡目标值,e为反馈误差,z为实际深度;G<sub>v</sub>(s)为AUV深度模型传递函数;f<sub>d</sub>(T<sub>0</sub>, t)和f<sub>f</sub>(T<sub>0</sub>, t)分别为AUV实际运动中下潜和上浮2种工况下的过渡函数.

为便于控制系统分析,根据二阶野本方程,忽略二阶以上水动力参数,将AUV模型传递函数表示为标准二阶系统形式:

$$G_v(s) = \frac{1}{s^2 + a_2s + a_1}, \quad (4)$$

式中:a<sub>1</sub>和a<sub>2</sub>为广义水动力参数,具体值依模型而定.过渡函数分别如式(5)-(6)所示.

下潜过渡函数:

$$f_f(T_0, t) = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 - \cos(\frac{t-t_0}{T_0}\pi)), & t_0 \leq t \leq T_0+t_0, \\ 1, & t < t_0 \cup t > T_0+t_0. \end{cases} \quad (5)$$

上浮过渡函数:

$$f_f(T_0, t) = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 + \cos(\frac{t-t_0}{T_0}\pi)), & t_0 \leq t \leq T_0+t_0, \\ 0, & t < t_0 \cup t > T_0+t_0. \end{cases} \quad (6)$$

#### 3.3 稳定性分析(Stability analysis)

现对AUV系统进行分析,将其表示为

$$\begin{cases} \ddot{x} = -a_1x - a_2\dot{x} + u, & a_1, a_2 > 0, \\ y = x, \end{cases} \quad (7)$$

式中:x表示输入目标值,u为AUV模型输入量.

对其输入阶跃信号v.在该控制器作用下,控制输入可表示为式(8)的形式:

$$u = K_p \cdot e + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \dot{e} = K_p \cdot (v' - y) + K_i \cdot \int_0^t ((v' - y)(\tau))d\tau + K_d \cdot d(v' - y), \quad (8)$$

式中:v'为输入信号v经非线性过渡函数处理后的值,可表示为v' = v · f(t).与传统PID控制控制器相比,误差反馈量变为e = v' - y.

现在,令

$$e_0(t) = \int_0^t e(\tau)d\tau,$$

那么,  $\dot{e}_0 = e,$

$$\begin{aligned} \ddot{e} &= \frac{d^2}{dt^2}(v' - x) = \ddot{v}' - \ddot{x} = \\ \ddot{v}' + a_1x + a_2\dot{x} - K_p \cdot e - K_i \cdot e_0 - K_d \cdot \dot{e} &= \\ \ddot{v}' + a_1(x - v') + a_1v' + a_2(\dot{v}' - \dot{e}) - K_p \cdot e - & \\ K_i \cdot e_0 - K_d \cdot \dot{e} &= \\ -K_i \cdot e_0 - (a_1 + K_p) \cdot e - & \\ (a_2 + K_d) \cdot \dot{e} + \ddot{v}' + a_2 \cdot \dot{v}' + a_1 \cdot v'. & \end{aligned} \quad (9)$$

因此,这种形式反馈率所决定的闭环系统运动方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{e}_0 = e_1 = e, \\ \dot{e}_1 = e_2, \\ \ddot{e}_2 = -K_i \cdot e_0 - (a_1 + K_p) \cdot e - (a_2 + K_d) \cdot \dot{e} + \\ \quad \ddot{v}' + a_2 \cdot \dot{v}' + a_1 \cdot v', \\ y = v' - e_1. \end{cases} \quad (10)$$

由劳斯稳定性判据可知, 得出系统稳定的条件为

$$\begin{cases} K_p + a_1 > 0, \\ K_d + a_2 > 0, \\ K_i > 0, \\ (K_p + a_1) \cdot (K_d + a_2) > K_i, \\ \ddot{v}' + a_2 \dot{v}' + a_1 v' \leq K, \end{cases} \quad (11)$$

式中K为常数. 其中

$$\begin{aligned} & \ddot{v}' + a_2 \dot{v}' + a_1 v' = \\ & v \cdot f''(T_0, t) + a_2 \cdot v \cdot f'(T_0, t) + a_1 v \cdot f(T_0, t). \end{aligned} \quad (12)$$

由于 $f(T_0, t)$ 为分段三角函数, 该函数及其各阶导数均有界, 只需设定合适的K值, 即可满足稳定性条件中 $\ddot{v}' + a_2 \dot{v}' + a_1 v' \leq K$ 的要求. 再根据具体的AUV水动力参数调整 $K_p, K_i, K_d$ 的值, 即可实现控制器对系统的稳定控制.

在实际工程中, AUV驱动控制到达目标驱动力时有一定延时, 为此提出, 在变深初期采用PID控制器, 在深度到达中间某一设定值 $V_m$ 后, 采用过渡目标值的PID控制算法.

因此, 目标深度变为如下表达式:

下潜目标深度:

$$V'_d = \begin{cases} V_m + (V_e - V_m) \cdot \frac{1}{2} (1 - \cos((\frac{t-t_0}{T_0})\pi)), \\ \quad t_0 \leq t \leq T_0 + t_0, \\ V_e, \quad t < t_0 \cup t > T_0 + t_0. \end{cases} \quad (13)$$

上浮目标深度:

$$V'_f = \begin{cases} V_e + (V_m - V_e) \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos((\frac{t-t_0}{T_0})\pi)), \\ \quad t_0 \leq t \leq T_0 + t_0, \\ V_e, \quad t < t_0 \cup t > T_0 + t_0. \end{cases} \quad (14)$$

在上面各式中,  $V_e$ 为最终目标深度,  $V_m$ 为过渡函数开始起作用的深度值,  $t_0$ 为深度达到 $V_m$ 的时刻,  $T_0$ 为过渡时间.

#### 4 AUV垂向运动仿真 (AUV vertical motion simulation)

本文选用某型AUV载体作为仿真研究对象. 将载体模型参数和各项水动力参数带入传递函数公式中, 得AUV深度运动的传递函数为

$$G(s) = \frac{z}{\delta_e} = \frac{0.3559s^2 + 5.226s + 35.2459}{s^4 + 10.0997s^3 + 8.3879s^2}. \quad (15)$$

利用MATLAB/Simulink进行模型搭建, 分别在传统PID和过渡目标值PID控制器进行了仿真研究. 此处控制器参数 $T_0 = 1, K_p = 25, K_i = 0.2, K_d = 15$ . 仿真曲线如图4所示.

由图4可以看出, 传统PID控制下, 系统响应缓慢, 进入稳态时间较长, 且存在超调和稳态误差; 过渡目标值PID控制下, 系统响应调节时间短, 快速跟踪并稳定在设定值, 无超调, 具有良好的动态响应特性.

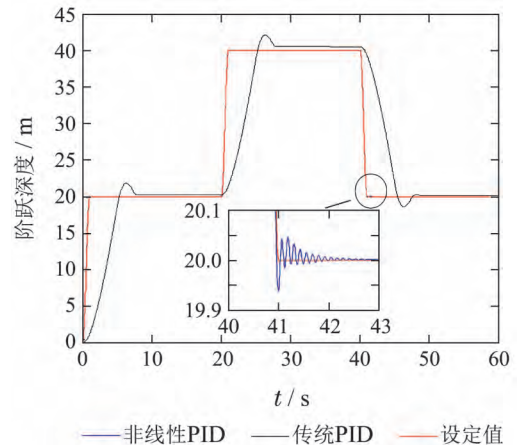


图 4 AUV深度运动仿真曲线

Fig. 4 The simulation curve of AUV vertical motion

在控制与消除误差方面, 两种控制器的性能比较如图5所示. 由曲线可以看出, 传统PID控制在AUV变深时由于输出值未能及时跟随设定值的跳变, 出现了很大的误差值; 而非线性过渡目标值PID控制下, 误差值基本保持在零值, 仅在变深瞬间有很小的波动. 充分验证了该非线性PID在控制和消除误差值方面的良好性能.

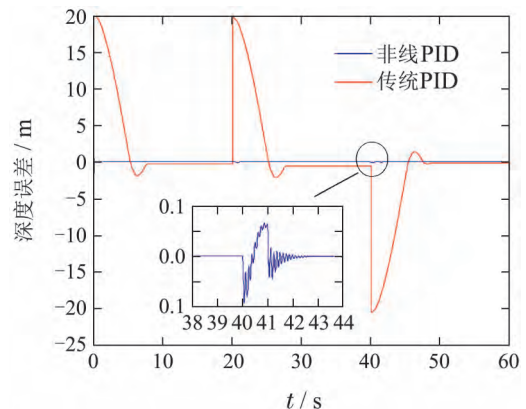
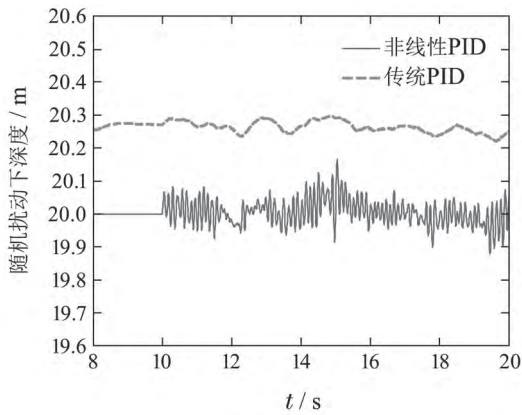


图 5 误差变化曲线

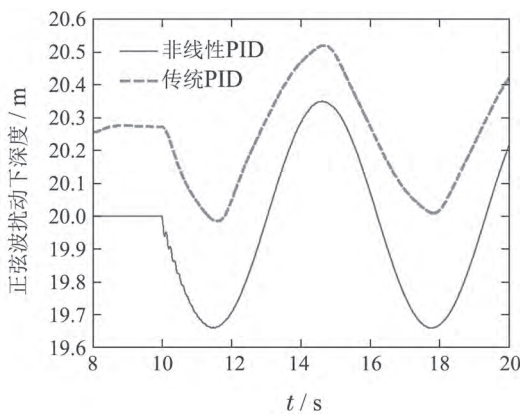
Fig. 5 The curve of depth error

由于AUV在航行过程中会遇到浪、流等干扰. 现通过施加随机扰动和正弦扰动来模拟水下干扰. 在10~20s处施加干扰, 得出两种控制器的抗干扰响应曲线, 如图6所示. 由图可以看出, 2种控制方式在抗干扰下的波动幅值均较小, 体现了良好的抗干扰性能.

图6中,传统PID方式下曲线在20.3 m处上下波动;非线性PID方式下,曲线在20 m处上下波动,无稳态误差,表明改进控制算法下的系统为无差系统.



(a) 随机扰动



(b) 正弦波扰动

图6 抗干扰响应曲线

Fig. 6 Anti-jamming response curve

### 5 试验分析(Trial analysis)

本试验用AUV长度为8.86 m,直径为534 mm,空气中净重2 t,最大下潜深度为200 m,水平舵舵角最大为25°. 本课题组于2016年12月在杭州千岛湖进行了AUV变深试验. 航行速度设定为4 Kn. 设定AUV进行下潜变深和上浮变深两种运动工况. 通过与传统PID控制方法进行对比分析,得出两种方法下的AUV变深运动的控制稳定性情况.

在传统PID控制下,目标深度从开始时刻便为目标值;而改进后控制算法是在目标值的基础上安排非线性过渡函数,先以最大误差量引入PID计算中,以输出最大驱动力来调节误差,而后当实际深度到达设定值 $V_m$ 后,引入过渡函数,来减缓误差量,以减少控制超调. 从图7曲线中可以看出,过渡函数作用的时间为10~60 s,这段时间内,目标深度变化较平稳,可通过改变 $T_0$ 值对其变化率进行修改,以适应不同的阶跃深度.

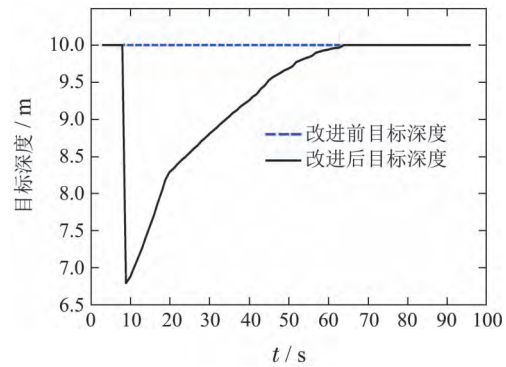
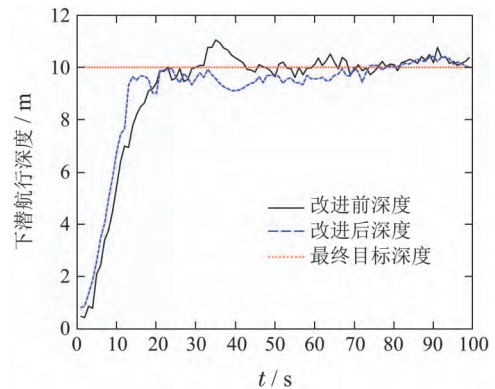


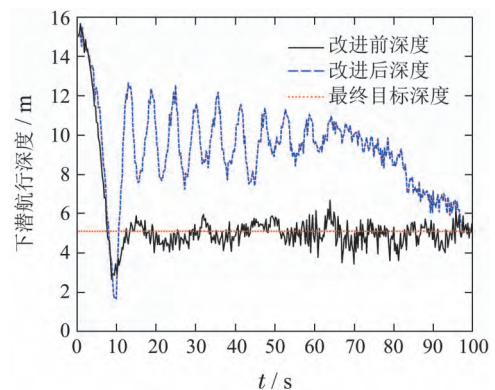
图7 两种控制器下的目标深度对比曲线

Fig. 7 Target depth comparison under the two controller

以下潜10 m和上浮10 m数据进行分析. 由图8可以看出AUV实际深度变化趋势.



(a) 下潜10 m变深



(b) 上浮10 m变深

图8 两种控制器下AUV实际深度对比曲线

Fig. 8 AUV actual depth comparison under the two controller

图8(a)为AUV从水面至水下10 m的变深曲线,可以看出两种方式下深度波动小,变化平稳. 但传统PID控制器作用下,最大超调量为10.5%. 在过渡目标值PID的作用下,深度变化平稳,最大超调量为4%,相比传统控制器,最大超调量降低50%以上;图8(b)为AUV从水下15 m至水下5 m的变深曲线,受水动力特性和航行体本身性能影响,AUV运动过程中受扰较大,上浮变深稳定性低于下潜变深. 从图8(b)传统控制方式

下的深度波动较大, 震颤严重, 调整时间长. 而在改进方式下, 深度波动小, 均方差减小137.3%, 过渡过程时间由105 s降低至17 s. 通过分析数据可以得出无论是下潜变深还是上浮变深, 过渡目标值的PID控制方法对AUV的深度稳定控制均明显优于传统PID, 其中, 过渡目标值的PID控制算法对上浮变深的改进效果优于下潜变深, 表明外扰越大, 改进效果越明显.

## 6 结论(Conclusions)

本文针对AUV做变深运动时易出现超调的问题, 提出增加过渡目标值函数的非线性PID控制方法. 采用劳斯判据对控制算法进行稳定性条件判断, 并采用MATLAB/Simulink进行模型可靠性的仿真验证. 基于实际工程应用角度, 考虑AUV的实际驱动性能, 对AUV变深的中间阶段采用过渡目标值的PID控制算法, 以此进行湖上试验. 与传统PID控制对比分析, 得出过渡目标值的非线性PID算法能实现良好的变深稳定控制. 在下潜10 m变深运动中, 超调量低于0.5, 相比传统PID控制, 缩减了50%; 在上浮10 m变深中, 相较于传统方式, 数值波动小, 均方差减小137.3%, 调整时间缩短5倍以上. 过渡目标值的非线性PID控制方法提高了变深运动的稳定性, 具有良好的工程应用性.

## 参考文献(References):

- [1] XU Yuru, LI Pengchao. The development of underwater robots [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2011, 33(3): 125 – 132.  
(徐玉如, 李彭超. 水下机器人发展趋势 [J]. 自然杂志, 2011, 33(3): 125 – 132.)
- [2] LI Ronghui. *Active disturbance rejection based tracking control of underactuated surface ships* [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013.  
(李荣辉. 欠驱动水面船舶航迹自抗扰控制研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2013.)
- [3] LI J H, LEE P M. Design of an adaptive nonlinear controller for depth control of an autonomous underwater vehicle [J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(17/18): 2165 – 2181.
- [4] JUN S W, KIM D W, LEE H J. Design of T-S fuzzy-model-based controller for depth control of autonomous underwater vehicles with parametric uncertainties [C] // *International Conference on Control, Automation and Systems*. Gyeonggi-do, South Korea: IEEE, 2011, 1: 1682 – 1684.
- [5] KHODAYARI M H, BALOCHIAN S. Modeling and control of autonomous underwater vehicle (AUV) in heading and depth attitude via self-adaptive fuzzy PID controller [J]. *Journal of Marine Science & Technology*, 2015, 20(3): 559 – 578.
- [6] ZHANG Lijun, JIA Heming, BIAN Xinqian, et al. Three-dimensional path tracking control for an autonomous underwater vehicle based on  $L_2$ -two disturbance attenuation method [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(5): 645 – 651.  
(张利军, 贾鹤鸣, 边信黔, 等. 基于 $L_2$ 扰抑制的水下机器人三维航迹跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(5): 645 – 651.)
- [7] PENG LI, LIN Ying, YANG Yi. Exploring on related technique in the control of complicated system [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2004, 29(6): 1066 – 1068.  
(彭莉, 林鹰, 杨奕. 复杂系统控制中的相关技术讨论 [J]. 西南师范大学学报, 2004, 29(6): 1066 – 1068.)
- [8] HUANG Jian. Application of variable integral PID in AUV heading attitude control [J]. *Industry Control and Applications*, 2014, 33(5): 44 – 60.  
(黄建. 变速积分PID在AUV航向姿态控制中的应用 [J]. 自动化技术与应用, 2014, 33(5): 44 – 60.)
- [9] XIONG Ying, XU Jian, HE Shuyang. Simulation of submarine hovering based on PID control [J]. *Ship Science and Technology*, 2010, 32(5): 107 – 110.  
(熊瑛, 许建, 何树阳. 基于PID的潜器悬停控制仿真研究 [J]. 舰船科学技术, 2010, 32(5): 107 – 110.)
- [10] WU Xiaoping, FENG Zhengping, ZHU Jimao. Application on AUV control based on fuzzy PID strategy [J]. *Ship Science and Technology*, 2007, 29(1): 95 – 98.  
(吴小平, 冯正平, 朱继懋. 模糊PID策略在AUV控制中的应用 [J]. 舰船科学技术, 2007, 29(1): 95 – 98.)
- [11] HAN Jingqing. Nonlinear PID controller [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1994, 20(4): 487 – 490.  
(韩京清. 非线性PID控制器 [J]. 自动化学报, 1994, 20(4): 487 – 490.)
- [12] SU Yuxin, DUAN Baoyan. A new class of nonlinear PID controller [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(1): 126 – 128.  
(苏玉鑫, 段宝岩. 一种新型非线性PID控制器 [J]. 控制与决策, 2003, 18(1): 126 – 128.)
- [13] TIAN Tian, LIU Jian, LIU Kaizhou. Application research of self-adaptive PID control used for AUV [J]. *Microcomputer Information*, 2008, 24(7): 10 – 12, 87.  
(田甜, 刘健, 刘开周. 自适应模糊PID控制在AUV控制中的应用 [J]. 微计算机信息, 2008, 24(7): 10 – 12, 87.)
- [14] LIU Di, LI Yan, ZHANG Da-wei. Simulation and research of a modified adaptive PID control algorithm [J]. *Instrumentation Technology*, 2014, 2(3): 50 – 51.  
(刘迪, 李岩, 张大为. 一种改进型自适应PID控制算法的仿真与研究 [J]. 仪表技术, 2014, 2(3): 50 – 51.)
- [15] CHEN Q, CHEN T, ZHANG Y. Research of GA-based PID for AUV motion control [C] // *International Conference on Mechatronics and Automation*. Changchun: IEEE, 2009, 2: 4446 – 4451.
- [16] ZHOU Huaqiang, HU Guangping. Application of improved genetic algorithm in PID control for robot [J]. *Microelectronics & Computer*, 2014, 11(7): 69 – 72.  
(周华强, 胡广平. 改进遗传算法在机器人PID控制中的应用 [J]. 微电子学与计算机, 2014, 11(7): 69 – 72.)
- [17] XIONG Huasheng, BIAN Xinqian, SHI Xiaocheng. Simulation of AUV heading control system using integral variable structure control principle [J]. *Ship Engineering*, 2005, 27(5): 30 – 33.  
(熊华胜, 边信黔, 施小成. 积分变结构控制原理在AUV航向控制中的应用仿真 [J]. 船舶工程, 2005, 27(5): 30 – 33.)
- [18] ZHENG Rong, MA Yantong, ZHANG Bin. AUV's near-bottom and low-speed sailing stability control based on vertical thruster [J]. *Robot*, 2016, 38(5): 588 – 592.  
(郑荣, 马艳彤, 张斌. 基于垂向推进方式的AUV低速近底稳定航行 [J]. 机器人, 2016, 38(5): 588 – 592.)
- [19] JIANG Xinsong, FENG Xisheng, WANG Ditang. *Unmanned Underwater Vehicles* [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2000.  
(蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000.)
- [20] HAN Jingqing. *Active Disturbance Rejection Control Technique* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.  
(韩京清. 自抗扰控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.)

## 作者简介:

马艳彤 (1990-), 女, 硕士研究生, 从事智能水下机器人运动控制研究, E-mail: yantongma@163.com;

郑荣 (1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 从事水下机器人总体设计, E-mail: zhengr@sia.cn;

于闯 (1976-), 男, 研究员, 从事水下机器人控制及软件总体设计, E-mail: yc@sia.cn.