

## 基于NDO的ROV变深自适应终端滑模控制器设计

魏延辉, 周卫祥, 陈巍, 胡佳兴, 李光春

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对ROV的深度控制问题, 提出基于非线性干扰观测器的自适应终端滑模控制方法. 详细叙述了控制器的设计过程, 并利用Lyapunov稳定性判据, 验证了存在模型参数不确定性和外干扰时, 系统的全局渐近稳定性和跟踪误差的收敛性. 仿真实验表明, 所提出的控制器不仅能够很好地估计并克服外干扰和模型不确定性等因素, 具有很好的鲁棒性能, 而且还可以实现在任意规定时刻变深运动的快速收敛.

**关键词:** ROV; 深度控制; 非线性干扰观测器; 自适应; 终端滑模控制器; 外干扰估计; 模型不确定性

中图分类号: TP242.2

文献标志码: A

## Design of adaptive terminal sliding mode controller based on nonlinear disturbance observer for ROV depth changing

WEI Yan-hui, ZHOU Wei-xiang, CHEN Wei, HU Jia-xing, LI Guang-chun

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China. Correspondent: ZHOU Wei-xiang, E-mail: zhou\_weixiang19@126.com)

**Abstract:** The problem focused on depth control for ROV is studied, and the adaptive terminal sliding mode controller based on nonlinear disturbance observer(NDO) is proposed. The design process is described in detail. By using the Lyapunov stability criterion, global asymptotic stability and tracking error convergence are proved when external disturbance and model uncertainties exist. Simulation studies show that the proposed controller can overcome and estimate factors such as external disturbance and model uncertainties well, and has good robust performance and the ability of rapid convergence for depth changing at any time.

**Keywords:** ROV; depth control; nonlinear disturbance observer; adaptive; terminal sliding mode controller; external disturbance estimation; model uncertainties

### 0 引言

ROV是一种通过脐带电缆提供动力, 遥控操作信息和安全保障设施的远程操作水下机器人. 它的运动模型是一种复杂的非线性耦合系统, 且受模型不确定性和外干扰的影响较大, 这就需要为ROV设计鲁棒性较强的控制器.

对于受不确定性和外干扰影响的机器人系统的控制器设计已有较多的研究成果, 其中尤以反步法(Back-stepping)和滑模控制方法为基础的控制设计发展迅速. 乔继红等<sup>[1]</sup>利用反步法原理对含有不确定性的机器人系统设计了自适应模糊输出反馈控制器, 并取得了很好的控制效果; 文献[2]采用自适应

Back-stepping方法实现了欠驱动自治水下机器人的三维航迹跟踪控制, 仿真结果表明, 其控制性能明显优于PID控制器; Nikoobin等<sup>[3]</sup>依据李雅普诺夫原理为串联机器人设计了干扰观测器; 高剑等<sup>[4]</sup>采用自适应积分反演方法解决了水下航行器的轴向运动控制问题, 并且取得了较好的控制效果; 文献[5]设计了不确定系统的模糊反步滑模控制器; Engeberg等<sup>[6]</sup>对假肢进行了自适应滑膜控制, 控制效果较好; 文献[7]将降阶的卡尔曼滤波器和滑模控制器相结合用于水下机器人的故障识别与容错控制, 并取得了很好的控制效果; Farjiadian等<sup>[8]</sup>提出了一种应用于非线性系统且可解决滑模控制器抖振的有效方法; 朱康武等<sup>[9]</sup>运

收稿日期: 2014-11-25; 修回日期: 2015-05-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51205074); 国家科学技术部国际科技合作项目(2014DFR10010); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(HEUCF041505); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20112304120007); 国防基础预研项目(A0420132202).

作者简介: 魏延辉(1978—), 男, 讲师, 博士, 从事机器人控制、可重构机器人以及水下机器人等研究; 李光春(1967—), 男, 研究员, 硕士, 从事惯性导航寻北技术、控制技术的研究.

用反演滑模方法为“海王号”ROV 设计了多自由度的鲁棒性控制器,经验证可知,该控制器控制效果较好;Joe 等<sup>[10]</sup>对所研究的 AUV 设计了其三维轨迹跟踪的二阶滑模变结构控制器,实验对比表明,所设计的控制器具有较好的控制性能。

传统的反演法 (Back-stepping) 虽然有着鲁棒性强,收敛速度快,能够解决非匹配性不确定性等优点,但是随着微分运算的增多,会出现“计算爆炸”现象;传统的滑模变结构控制器虽然能够使系统对外界干扰、自身的参数变化和不确定性不敏感,但是理论上它的收敛时间无穷大,而在实际的工况中,有些情形是需要在有限的时间内达到误差收敛的。此外,滑模控制器不可避免地存在“抖振”现象,这也对执行器的性能提出了巨大的挑战。本文针对包含模型不确定性和外干扰等的 ROV 模型进行控制器设计。该设计能够估计不确定性和外干扰的观测器,抵消并改善不确定性和外干扰对 ROV 运动的影响,而对于不能用观测器估计的干扰项,则使用强鲁棒性滑膜控制。为了能够解决普通滑模控制器收敛时间无限长的问题,本文采用终端滑模控制器达到有限时间内实现误差收敛的效果。通过自适应项在线估计不确定性,使滑模控制器摆脱对不确定性上界的依赖。通过采用观测器进行外干扰抵消以及采用饱和函数替代滑模项中符号函数的方法,极大地改善了系统抖振问题。

## 1 ROV 自由度垂向运动数学模型

本文以 ROV 的垂向运动作为控制对象,针对运动中的模型不确定性和外干扰设计控制器。ROV 单自由度垂向运动的数学模型为

$$\begin{cases} \dot{z} = w, \\ \dot{w} = \frac{1}{m - Z_{\dot{w}}} \tau_z + \frac{Z_{w|w}}{m - Z_{\dot{w}}} w|w| + f. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $z$  为 ROV 的深度,  $w$  为 ROV 下潜或者上浮的速度,  $m$  为 ROV 的质量,  $Z_{\dot{w}}$  和  $Z_{w|w}$  为 ROV 的水动力参数,  $f$  包含了 ROV 的建模误差、参数变化、外干扰以及其他不确定性因素,  $\tau_z$  为推力大小,推进器的布局参见文献 [11]。

为了便于设计控制器,可以将 ROV 模型改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + bu + f. \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $x_1 = z$ ,  $x_2 = w$ ,  $f(x_1, x_2) = \frac{Z_{w|w}}{m - Z_{\dot{w}}} w|w|$ ,  $u = \tau_z$ ,  $b = \frac{1}{m - Z_{\dot{w}}}$ 。

## 2 变深控制器设计

基于 NDO 的自适应终端滑模控制器结构如图 1 所示。基于非线性干扰观测器 (NDO) 的自适应终端滑模控制器由两部分组成: 观测器部分和含有自适应项的终端滑模控制器。两部分控制输出相减得到实

际控制输出  $u$ ,  $u$  作用在 ROV 上, ROV 的运动状态  $x_1$ 、 $x_2$  反馈给控制, 以实现控制闭环。这两个反馈量的引入是设计滑模面所需要的:  $x_1$  的引入是为了推导位置误差,  $x_2$  的引入是为了推导速度误差, 即位置误差的变化量。

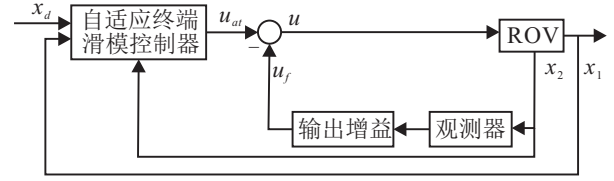


图 1 基于 NDO 的自适应终端滑模控制器结构

### 2.1 非线性干扰观测器设计

定义观测器误差

$$\tilde{f} = f - \hat{f}. \quad (3)$$

一般不可能获得干扰  $f$  的一阶微分先验知识, 假设干扰  $f$  的变化相对于干扰观测器的动态性能而言非常缓慢, 则可以得到  $\dot{f} = 0$ 。对式 (3) 求导可以得到

$$\dot{\tilde{f}} = \dot{f} - \dot{\hat{f}} = -\dot{\hat{f}}. \quad (4)$$

考虑如下形式的非线性干扰观测器<sup>[12-13]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\hat{f}} = e + N(x_2), \\ \dot{e} = -Le + L(-N(x_2) - f(x_1, x_2) - bu). \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $e$  为 NDO 的内部变量;  $\hat{f}$  为 NDO 的输出;  $N(x_2)$  为待设计的非线性函数;  $L$  为 NDO 的输出增益, 取

$$L\dot{x}_2 = \frac{dN(x_2)}{dt}. \quad (6)$$

式 (4) 可以改写为

$$\dot{\tilde{f}} = -\dot{\hat{f}} = -e - \dot{N}(x_2) = -L\tilde{f}. \quad (7)$$

取 NDO 的输出增益  $L = a$ ,  $a > 0$ , 对微分方程 (7) 求解, 可得

$$\tilde{f}(t) = \tilde{f}(0)e^{-at}. \quad (8)$$

由式 (8) 可以看出, 观测器的观测误差是呈指数收敛到零的。将 NDO 的输出通过输出增益并转化到动力学方程中, 得到

$$\dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + b\left(u' + \frac{\hat{f}}{b}\right), \quad (9)$$

其中  $u' = u + \frac{\hat{f}}{b}$  且  $b > 0$ 。由此可知

$$u_f = \frac{\hat{f}}{b}. \quad (10)$$

将式 (10) 代入系统 (2) 的第 2 个子系统, 可得

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= f(x_1, x_2) + b(u_{at} - u_f) + f = \\ &= f(x_1, x_2) + bu_{at} + \tilde{f}. \end{aligned} \quad (11)$$

由上式可以看出, 通过添加非线性干扰观测器可以减小系统的不确定性和外干扰。系统 (2) 可以变为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + bu_{at} + \Delta, \end{cases} \quad (12)$$

其中  $\Delta = \tilde{f}$ 。

### 2.2 自适应终端滑模控制器设计

**假设 1** 系统的期望输出  $x_d$  的二阶导数存在, 且  $|\Delta| \leq \delta$ .

通过设计控制律使系统状态  $x$  在有限时间内实现对期望状态  $x_d$  的跟踪. 对系统 (12) 定义误差向量

$$E = [e, \dot{e}]^T, e = x_1 - x_{1d}, \dot{e} = x_2 - x_{2d}. \quad (13)$$

取  $c = [c_1, c_2], c_1, c_2 > 0$ , 设计滑模面

$$\begin{cases} \sigma = cE - w(t), \\ w(t) = cP(t), \\ P(t) = [p(t), \dot{p}(t)]^T. \end{cases} \quad (14)$$

选取如下函数:

1) 当  $0 \leq t \leq T$  时, 有

$$p(t) = \sum_{k=0}^2 \frac{1}{k!} e^{(k)}(0) t^k + \sum_{j=0}^2 \left( \sum_{i=0}^2 \frac{n_{ji}}{T^{j-i+3}} e^{(i)}(0) \right) t^{j+3}; \quad (15)$$

2) 当  $t > T$  时, 有

$$p(t) = 0. \quad (16)$$

将式 (15) 展开并求其一阶、二阶导数, 可得

$$\begin{aligned} \dot{p}(t) &= \dot{e}(0) + \ddot{e}(0) + 3 \times \left( \frac{n_{00}}{T^3} \dot{e}(0) + \frac{n_{01}}{T^2} \ddot{e}(0) \right) t^2 + \\ &4 \times \left( \frac{n_{10}}{T^4} \dot{e}(0) + \frac{n_{11}}{T^3} \ddot{e}(0) \right) t^3 + \\ &5 \times \left( \frac{n_{20}}{T^5} \dot{e}(0) + \frac{n_{21}}{T^4} \ddot{e}(0) \right) t^4, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \ddot{p}(t) &= \ddot{e}(0) + 6 \times \frac{n_{00}}{T^3} \ddot{e}(0) t + 12 \times \frac{n_{10}}{T^4} \ddot{e}(0) t^2 + \\ &20 \times \frac{n_{20}}{T^5} \ddot{e}(0) t^3. \end{aligned} \quad (18)$$

当  $t = 0$  时,  $p(t) = 0, \dot{p}(t) = 0, \ddot{p}(t) = 0$  的必要条件为

$$\begin{cases} n_{00} = -10, \\ n_{10} = 15, \\ n_{20} = -6; \end{cases} \begin{cases} n_{01} = -6, \\ n_{11} = 8, \\ n_{21} = -3; \end{cases} \begin{cases} n_{02} = -1.5, \\ n_{12} = 1.5, \\ n_{22} = -0.5. \end{cases} \quad (19)$$

将式 (19) 代入式 (16)~(18) 可得  $p(t), \dot{p}(t), \ddot{p}(t)$  的具体表达式.

对滑模面  $\sigma$  求导, 可得

$$\dot{\sigma} = c\dot{E} - \dot{w}(t) = c_1(\dot{e} - \dot{p}(t)) + c_2(\ddot{e} - \ddot{p}(t)). \quad (20)$$

由式 (13) 可得

$$\ddot{e} = \dot{x}_2 - \dot{x}_{2d} = \dot{x}_2 - \ddot{x}_{1d}. \quad (21)$$

将式 (21) 代入 (20), 可得

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= c_1(\dot{e} - \dot{p}(t)) + c_2(f(x_1, x_2) + bu_{at} + \\ &\Delta - \ddot{x}_{1d} - \ddot{p}(t)). \end{aligned} \quad (22)$$

取李雅普诺夫函数

$$V = \frac{1}{2} \sigma^2, \quad (23)$$

求导可得

$$\dot{V} = \sigma c_2 \left( \frac{c_1}{c_2} (\dot{e} - \dot{p}(t)) + bu_{at} + f(x_1, x_2) \right) +$$

$$\sigma c_2 (\Delta - \ddot{x}_{1d} - \ddot{p}(t)). \quad (24)$$

取控制律

$$\begin{aligned} u_{at} &= \frac{1}{b} \left( -\frac{c_1}{c_2} (\dot{e} - \dot{p}(t)) - f(x_1, x_2) + \ddot{x}_{1d} \right) + \\ &\frac{1}{b} (\ddot{p}(t) - (\hat{\Delta} + k) \text{sgn}(\sigma)), \end{aligned} \quad (25)$$

其中  $k > 0$ .

由此可得  $\dot{V} = \sigma c_2 (\Delta - (\delta + k) \text{sgn}(\sigma)) < 0$ , 可知李雅普诺夫函数负定, 系统全局渐近稳定, 系统 (12) 的误差在时间  $T$  内可以收敛至零. 但是控制律 (25) 需要知晓上界  $\delta$ , 而实际应用上上界  $\delta$  是很难获知的. 为了避免使用上界  $\delta$ , 在控制律中添加自适应项  $\Delta$  在线估计, 具体步骤如下:

定义

$$\tilde{\Delta} = \Delta - \hat{\Delta}. \quad (26)$$

其中:  $\tilde{\Delta}$  为  $\Delta$  的估计误差,  $\hat{\Delta}$  为  $\Delta$  的估计值. 对式 (26) 求导并假设  $\Delta$  变化缓慢, 则  $\dot{\tilde{\Delta}} = -\dot{\hat{\Delta}}$ .

取新的李雅普诺夫函数<sup>[14-15]</sup>

$$V = \frac{1}{2} \sigma^2 + \frac{1}{2\xi} \tilde{\Delta}^2. \quad (27)$$

对式 (27) 求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sigma c_2 \left( \frac{c_1}{c_2} (\dot{e} - \dot{p}(t)) + bu_{at} + f(x_1, x_2) \right) + \\ &\sigma c_2 (\hat{\Delta} - \ddot{x}_{1d} - \ddot{p}(t)) + \tilde{\Delta} \left( \sigma c_2 - \frac{1}{\xi} \dot{\tilde{\Delta}} \right). \end{aligned} \quad (28)$$

取控制律和自适应律分别为

$$\begin{aligned} u_{at} &= \frac{1}{b} \left( -\frac{c_1}{c_2} (\dot{e} - \dot{p}(t)) - f(x_1, x_2) + \ddot{x}_{1d} \right) + \\ &\frac{1}{b} (\ddot{p}(t) - (\hat{\Delta} + k) \text{sat}(\sigma/\varsigma)), k > 0; \end{aligned} \quad (29)$$

$$\dot{\hat{\Delta}} = \xi \sigma c_2. \quad (30)$$

将式 (29)、(30) 代入 (28) 可得  $\dot{V} < 0$ . 为了进一步改善控制器的抖振问题, 采用饱和函数  $\text{sat}$  代替控制器 (25) 中的  $\text{sgn}$  函数,  $\text{sat}$  函数为

$$\text{sat}(\sigma/\varsigma) = \begin{cases} 1, & \sigma/\varsigma > 1; \\ \sigma/\varsigma, & -1 \leq \sigma/\varsigma \leq 1; \\ -1, & \sigma/\varsigma < -1. \end{cases} \quad (31)$$

综上所述, 根据原理框图 1, 基于 NDO 的 ROV 变深自适应终端滑模控制器控制律为

$$\begin{cases} u = u_{at} - u_f, \\ \dot{\hat{\Delta}} = \xi \sigma c_2. \end{cases} \quad (32)$$

### 3 仿真实验

为了验证控制器的控制性能, 需要进行控制器的仿真实验, ROV 模型参数和控制器参数如表 1 所示.

表 1 ROV 模型参数和控制器参数

$m/\text{kg}$	$Z_{\dot{w}}/\text{kg}$	$Z_{w w }/(\text{kg/m})$	$c_1$	$c_2$	$\xi$	$a$	$k$	$\varsigma$
180	-80	-150	5	1	3.5	3	10	0.05

模型包含外干扰和不确定项

$f = 3\sin(0.02\pi t) + 0.2\text{sgn}(x_1) + 0.1x_1 + 0.05\text{rand}$ , 其中rand为正态分布随机项. 考虑到实际情况, 控制器输出限定在  $\pm 100$  kgf 之间.

1) 为了验证所设计控制器能够实现任意期望时间内的收敛, 进行不同收敛时间  $T$  的仿真实验, 如图2所示. 给定期望路径为  $x_{1d} = 3\sin(0.04\pi t)$ , ROV 的初始深度为 2m, 初始速度为 0m/s.

① 设期望收敛时间  $T = 20$  s. 由图2可知, 跟踪误差在  $T = 20$  s时收敛到零, 跟踪路径平滑, 控制器输出也较为平滑, 且推力输出没有超过规定上限.

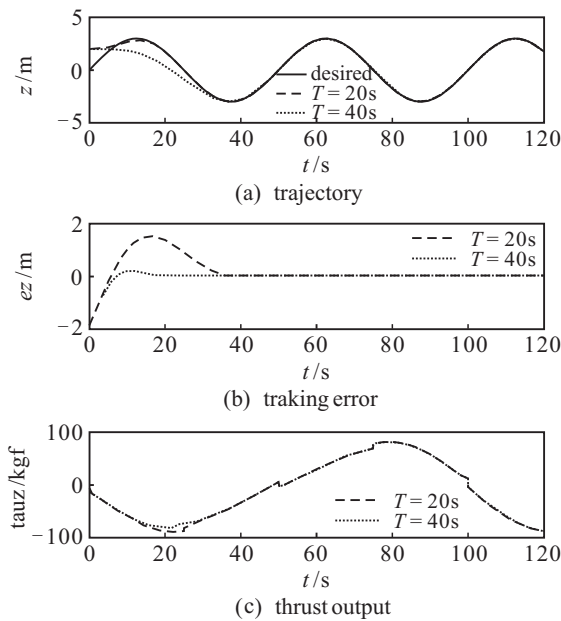


图 2  $T = 20$  s,  $T = 40$  s 跟踪效果和推力输出

$T = 20$  s时 NDO 观测和自适应项估计效果如图3所示.

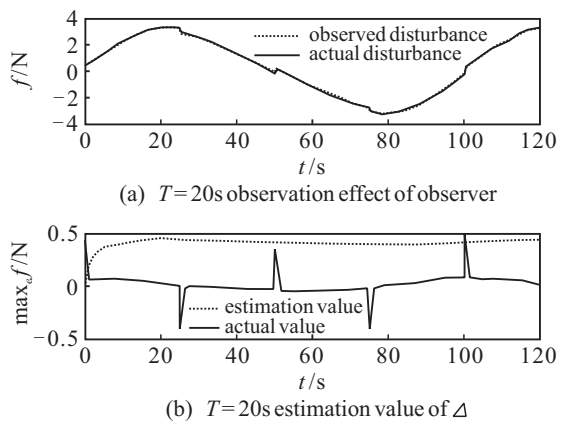


图 3  $T = 20$  s时 NDO 观测和自适应项估计效果

由图3可知: 非线性干扰观测器能够快速并准确地观测到外干扰和不确定项, 对于rand正态分布随机项的观测效果较差, 但是由于自适应滑模控制器的存在, 系统可以较好地抵抗未准确观测出的不确定性部分, 得到较好的跟踪效果; 自适应项的估计值大于观测器观测误差的上界, 这不仅让终端滑模变结构

控制器摆脱了对不确定性上界的依赖, 而且保证了系统的稳定性. 虽然符号函数会带来大于上界估计值的“毛刺”, 但是由于存在时间很短, 对系统的影响很小. 一方面用饱和函数代替了控制器中的符号函数, 另一方面非线性干扰观测器大大减小了不确定性和外干扰上界, 因此系统抖振得到很好的改善.

② 设期望收敛时间  $T = 40$  s. 由图2可知, 跟踪误差在  $T = 40$  s时收敛到零, 跟踪路径较为平滑, 说明所设计的控制器能够达到在任意时刻实现跟踪路径收敛的效果.

$T = 40$  s时 NDO 观测和自适应项估计效果如图4所示.

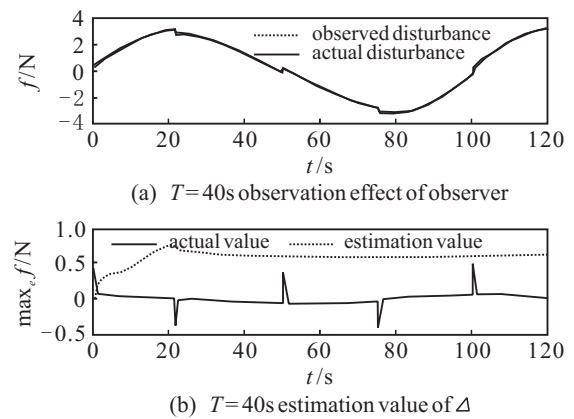


图 4  $T = 40$  s时 NDO 观测和自适应项估计效果

由图4可知, 非线性干扰观测器能够快速并准确地观测到外干扰和不确定项, 自适应项也能够较好地估计  $\Delta$  上界值; 与仿真①对比可知, 虽然期望的收敛时间不同, 但控制器的控制效果并没有明显变化.

2) 为了验证所设计控制器在 ROV 大深度运动变化中的优越性, 进行如下实验: 设定目标深度  $x_d = 50$  m; 由于  $x_d$  的二阶导数在  $t = 0$  时刻是不存在的, 需要对期望指令信号进行滤波, 选择前置滤波器  $K_\tau = \frac{1}{10s + 1}$ ; ROV 初始位置为 0m, 初始速度为 0m/s, 期望的收敛时间  $T = 60$  s, 其他参数不变. 控制效果如图5所示.

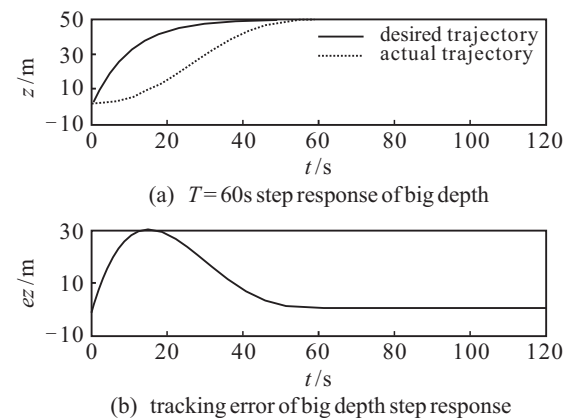


图 5 大深度阶跃响应控制效果

由图5可知, ROV的跟踪误差在期望时间内实现收敛, 跟踪轨迹平滑无超调, 所设计的控制器在ROV大深度阶跃响应的运动控制中表现出优越的性能。

#### 4 结 论

本文针对ROV深度控制问题, 提出了一种基于非线性干扰观测器的自适应终端滑模控制器。设计了非线性干扰观测器并对外干扰和不确定性进行初步估计; 设计了自适应终端滑模控制器并对不确定性和外干扰进行进一步补偿, 保证了系统的全局稳定性, 使系统能够较为快速并准确地跟踪期望轨迹。

推理和仿真表明, 本文所提出的控制器有以下优点: 1) 能够在任意规定的有限时间 $T$ 内实现误差收敛, 克服普通滑模控制器收敛时间无限长问题, 且具有较强的鲁棒性能; 2) 非线性干扰观测器能够较准确并快速地估计外干扰和模型不确定性, 对降低系统抖振、提高系统性能具有巨大作用; 3) 所设计的滑模控制器由于自适应项的存在, 不再依赖不确定性上界, 能够在线自动估计不确定性值; 4) 所设计的控制器无论是在小深度连续变化还是在大深度阶跃响应的控制中, 都具有极好的控制性能。

#### 参考文献(References)

- [1] Qiao J H, Dai Y P, Liu J K, et al. Robust adaptive fuzzy output tracking control of uncertain robot system using backstepping design[C]. Proc of the 26th Chinese Control Conf. Zhangjiajie: IEEE Press, 2007: 303-308.
- [2] 贾鹤鸣, 程相勤, 张利军, 等. 基于自适应Back-stepping的欠驱动AUV三维航迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2012, 27(5): 652-664.  
(Jia H M, Cheng X Q, Zhang L J, et al. Three-dimensional path tracking control for underactuated AUV based on adaptive Back-stepping[J]. Control and Decision, 2012, 27(5): 652-664.)
- [3] Nikoobin A, Haqhihi R. Lyapunov-based nonlinear disturbance observer for serial  $n$ -Link robot manipulators[J]. J of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications, 2009, 55(2/3): 135-153.
- [4] 高剑, 赵宁宁, 徐德民, 等. 水下航行器轴向运动的自适应积分反演跟踪控制[J]. 兵工学报, 2008, 29(3): 374-378.  
(Gao J, Zhao N N, Xu D M, et al. Adaptive integral Back-stepping surge motion tracking control for an underwater vehicle[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(3): 374-378.)
- [5] Hou H Q, Miao Q, Gao Q H, et al. Fuzzy Backstepping sliding mode control for mismatched uncertain system[J]. J of Engineering Science and Technology Review, 2014, 7(2): 175-181.
- [6] Engeberg E D, Meek S G. Adaptive sliding mode control of grasped object slip for prosthetic hands[C]. IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems. San Francisco: IEEE Press, 2011: 4174-4179.
- [7] 袁芳, 朱大奇, 叶银忠. 基于降阶卡尔曼滤波器的水下机器人滑模容错控制[J]. 控制与决策, 2011, 26(7): 1031-1035.  
(Yuan F, Zhu D Q, Ye Y Z. Sliding-mode fault-tolerant control method of underwater vehicle based on reduced-order Kalman filter[J]. Control and Decision, 2011, 26(7): 1031-1035.)
- [8] Farjiadian A B, Yazdanpanah M J, Shafai B. Application of reinforcement learning in sliding mode control for chattering reduction[C]. Proc of the World Congress on Engineering. London: Newswood Limited, 2013: 743-747.
- [9] 朱康武, 顾临怡, 马新军, 等. 水下运载器多变量鲁棒输出反馈控制方法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(8): 1397-1406.  
(Zhu K W, Gu L Y, Ma X J, et al. Studies on multivariable robust output feedback control for underwater vehicles[J]. J of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(8): 1397-1406.)
- [10] Joe H, Kim M, Yu S. Second-order sliding-mode control for autonomous underwater vehicle in the presence of unknown disturbances[J]. Nonlinear Dynamics, 2014, 78(1): 183-196.
- [11] 朱康武, 顾临怡. 作业型遥控水下运载器的多变量Backstepping鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(10): 1441-1446.  
(Zhu K W, Gu L Y. Multivariable Backstepping robust control for work-class remotely operated vehicle[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(10): 1441-1446.)
- [12] Qiao J H, Wang H Y. Backstepping control with nonlinear disturbance observer for tank gun control system[C]. Proc of the 2011 Chinese Control and Decision Conf. Mianyang: IEEE Press, 2011: 251-254.
- [13] 陈谋, 邹庆元, 姜长生, 等. 基于神经网络干扰观测器的动态逆飞行控制[J]. 控制与决策, 2008, 23(3): 283-287.  
(Chen M, Zou Q Y, Jiang C S, et al. Dynamical inversion flight control based on neural network disturbance observer[J]. Control and Decision, 2008, 23(3): 283-287.)
- [14] Lin K J. Sliding mode control design for uncertain singular systems[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 145: 16-20.
- [15] Ngo Q H, Hong K S. Adaptive sliding mode control of container cranes[J]. IET Control Theory and Applications, 2012, 6(5): 662-668.

(责任编辑: 闫 妍)