

滑动控制理论在海洋机器人 动态定位系统中的应用

安宏声 蒋新松

(中国科学院沈阳自动化研究所)

摘要 本文论述了一种新的鲁棒性控制方法——滑动控制理论。并将该方法应用于海洋机器人的动态定位系统设计。仿真结果表明该方法是相当成功和有效的。对系统的参数变化有强鲁棒性。

关键词: 滑动控制理论, 水下机器人, 动态定位系统。

1 引言

海洋机器人的控制问题近年来引起了许多专家的注意。由于其本身形状的不对称及非流线型, 海流的冲击, 拖缆的影响, 机械手对本体的反作用的影响, 使其动力学模型难以准确测得, 即使可以测得粗略的模型, 也是时变, 强耦合及非线性的, 故应用经典线性理论进行设计时, 就必须在某些典型工作点附近做线性化处理, 而后进行去耦合和控制器设计。由于参数的时变特性及干扰的难以测量, 难以保证性能在大范围内保持不变。而滑动控制则可以对不准确的动力学模型和不可测干扰进行直接设计, 并且具有很强的鲁棒性。另外这种方法还具有解耦功能, 因此无须进行解耦设计, 无须对不同的工作点设置不同的控制器, 因此该方法简单直接, 鲁棒性极好, 是一种具有广泛应用前景的方法。

2 滑动控制的理论基础

一个典型的单输入单输出系统, 我们可以用下述方程描述:

$$x^{(n)}(t) = b(X, t)[f(X, t) + u(t) + d(t)] \quad (1)$$

其中: $b(X, t)$ 为符号及上限已定的连续函数; $f(X, t)$ 为时变、连续的非线性项; $u(t)$ 为系统的控制量; $d(t)$ 为时变干扰, 上限可以估计。

假设该模型中没有一项是可以准确测得的, 但只要它们的估计值和估计误差已知, 则可以利用这些估计值而不是准确值及估计误差上限设计一个鲁棒性控制器。

$f(X, t)$ 的不确定性可以表示如下:

$$f(X, t) = \hat{f}(X, t) + \Delta f(X, t) \quad (2)$$

这里: $\hat{f}(X, t)$ 为 $f(X, t)$ 的估计值; $\Delta f(X, t)$ 为估计误差。其上限已定, 可表示为: $|\Delta f(X, t)| \leq \delta f(X, t)$

$b(X, t)$ 的不确定性可表示如下:

$$1/\beta \leq \hat{b}(X, t)/b(X, t) \leq \beta, \quad \beta \geq 1 \quad (3)$$

其中 $\hat{b}(X, t)$ 为 $b(X, t)$ 的估计值(或实测值)。

扰动 $d(t)$ 的不确定性可以表示为:

$$|d(t)| \leq D(t) \quad (4)$$

这里: $X = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})'$, 为系统的状态向量。

对轨迹跟踪或定位控制来说, 目的是即使 $b(X, t)$, $f(X, t)$ 及 $d(t)$ 存在不确定性时, 也能使状态 X 跟踪理想轨迹 $X_d(t)$, 这里

$$X_d(t) = (x_d(t), \dot{x}_d(t), \dots, x_d^{(n-1)}(t))'$$

我们再定义跟踪误差向量

$$\tilde{X} = X_d - X = (\tilde{x}(t), \dot{\tilde{x}}(t), \dots, \tilde{x}^{(n-1)}(t))', \quad \tilde{x} = x_d - x \quad (5)$$

再定义一个时变的滑动曲面

$$S(X, t) = [d/dt + \lambda]^{-1} \tilde{x}, \quad \lambda > 0 \quad (6)$$

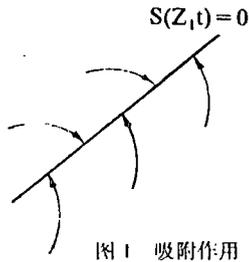
λ 为系统的期望频带, 其选择规则见文献[1]。假设 $X(t)|_{t=0} = X_d(t)|_{t=0}$, 即 $\tilde{X}(t)|_{t=0} = 0$, 则完全跟踪 $X_d(t)$ 就等价于系统状态停留在 $S(t) = 0$ 上。因为 $S(X, t) \equiv 0$ 的所对应的唯一线性解为 $\tilde{X} \equiv 0$, 即跟踪 n 维

向量问题就转化为保持标量函数 $S(X,t)=0$ 。

参见文献[1]。这个条件可以通过适当选择(1)式中的控制量 $u(t)$ ，使得当 $S(X,t) \neq 0$ 时，有下式成立：

$$\frac{1}{2} \frac{ds^2}{dt} \leq -C \cdot |s| \tag{7}$$

C 为正常数。由此式知状态轨迹有 $S(X,t)=0$ 的趋势，即表现为 $S(X,t)=0$ 这个空间曲面对状态变量 $X(t)$ 有吸附作用，如图 1 所示。



式(6)，(7)的思想在于适当建立一个关于误差的函数如(6)式，而后恰当地选择一个反馈控制规律使之满足式(7)，则即使在存在干扰及参数不确定性的情况下， S^2 可以代表系统的闭环的 lyapunov 函数，进而保证系统的稳定性及跟踪特性。

另外式(7)还保证当 $\bar{x}(0) \neq \bar{0}$ 时， $S(X,t)$ 也将将在有限的时间 t_1 内趋于零。这里：

$$t_1 \leq |S(X,t)| / C \tag{8}$$

据上述讨论，我们把控制量 u 按其作用分成两部分。第一部分是连续控制量，主要补偿系统可估计(测量)的动态特性，我们称之为 \hat{u} 。这由使 $S(X,t)=0$ 而得。参见文献[1]及[2]有：

$$\hat{u} = -\hat{f}(X,t) + (\dot{x}_d^{(n)} + \sum_{i=1}^{n-1} C_n^i \lambda^i \bar{x}^{(n-i)}) / \hat{b}(X,t) \tag{9}$$

对二阶系统变为：

$$\hat{u} = -\hat{f}(X,t) + (\ddot{x}_d + \lambda \dot{x}) / \hat{b}(X,t) \tag{10}$$

由于 \hat{f} 与 f 的不完全一致，且未对干扰进行补偿，因此单纯式(9)并不能恒满足式(7)，即对参数不确定性不具有鲁棒性。故需要在 \hat{u} 后再加上 一部分控制量。这一项在状态穿越滑动面时要发生跳变。此时 u 的形式变为

$$u = \hat{u} + K(X,t) \text{sgn}(s) \tag{11}$$

这里： $\text{sgn}(s) = 1, s \geq 0$ ； $\text{sgn}(s) = -1, s < 0$ 。

$K(X,t)$ 是与参数不确定性有关的量。参见文献[1]，[2]可知，当 $K(X,t)$ 满足下式条件时，即：

$$K(X,t) = F(X,t) + D(t) + X\beta - 1) (\dot{x}_d^{(n)} + \sum_{i=1}^{n-1} C_n^i \lambda^i \bar{x}^{(n-i)}) / \hat{b}(X,t) \tag{12}$$

则可以保证式(7)成立。

显然 $K(X,t)$ 是随参数的不确定性变化而变化的，以补偿它们对系统的动态特性的影响，保持闭环系统的稳定性。因为该式保证了式(7)，从而使 S^2 成为闭环系统的稳定收敛的 lyapunov 函数。

但第二项是不连续的，故有可能引起系统的振荡现象。参见文献[2]、[3]，这个问题可以通过在滑动面周围设置一个边界层来解决，这个边界层定义如下：

$$B(X,t) = \{X | S(X,t) \leq \varphi\} \tag{13}$$

φ 为选定的边界层厚度，之后可以用饱和函数 $\text{sat}(s/\varphi)$ 来代替不连续项 $\text{sgn}(s)$ ： $\text{sat}(s/\varphi) = s/\varphi$ ； $|s| < \varphi$ ； $\text{sat}(s/\varphi) = \text{sgn}(s/\varphi)$ ， $|s| > \varphi$ 。

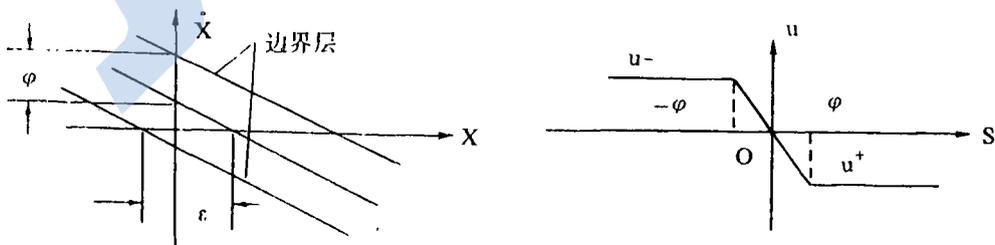


图2 边界层厚度

这相当于在边界层两边提供一个线性内插,因而保证了系统控制量 u 的连续性,消除了引起振荡的危险。

对于二阶系统,边界层厚度 φ 可以是固定的,其示意图如图 2。

对高阶系统,只要频带 λ 与忽略的模态相比足够小,则期望厚度也可以选为固定的,即

$$\varphi = [\beta \hat{b}(X_d, t) K(X_d, t)] \max / \lambda \quad (14)$$

可见 φ 值决定于沿给定轨迹的参数不确定性和期望频带 λ 。

为获得更好的控制效果, φ 可以是时变的,以获得更好的动态特性,即使之当参数不确定性增大时变厚;参数不确定性减小时变薄,具有一定的适应性。如参考文献[1]所述,通过适当修改稳定性条件(7),可得如下结论:

$$\varphi(t) + \lambda \varphi(t) = \beta \hat{b}(X_d, t) K(X_d, t), \quad K(X_d, t) \geq \lambda(a, t) / \beta \hat{b}(X_d, t) \quad (15)$$

$$\varphi(t) + \lambda \varphi(t) / \beta^2 = \hat{b}(X_d, t) K(X_d, t) / \beta, \quad K(X_d, t) < \lambda \varphi(t) / \beta \hat{b}(X_d, t) \quad (16)$$

相应的控制规律变为:

$$u = \hat{u} + \bar{K}(X, t) \text{sat}(s / \varphi) \quad (17)$$

$$\bar{K}(X, t) = K(X, t) - K(X_d, t) + \lambda \varphi(t) / \beta \hat{b}(X_d, t) \quad (18)$$

同理可以将空间滑动曲面定义为如下形式:

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^n \int \bar{x} dt \quad (19)$$

则相应的控制量变为:

$$\hat{u} = -\hat{f}(X, t) + [x_d^{(n)} + \sum_{i=1}^n C_n^i \lambda^i \bar{x}^{(n-i)}] / \hat{b}(X, t) \quad (20)$$

对二阶系统变为如下具体形式:

$$\hat{u} = -\hat{f}(X, t) + (\ddot{x}_d + 2\lambda \dot{\bar{x}} + \lambda^2 \bar{x}) / \hat{b}(X, t) \quad (21)$$

别的规律依然成立。

比较式(6)和式(19),我们称式(6)所定义的控制规律为比例加微分控制;而式(19)所定义的控制规律为比例加积分加微分控制,即 PID 规律。

下面我们将运用这两种控制规律对水下机器人 HR01 的航向回路进行设计,以验证控制效果。

3 滑动控制理论设计的动态定位系统

所谓动态定位就是指载体(船,水下机器人)不依靠物理约束(如锚等),而依靠自身动力系统使自身姿态与一期望位姿在允许偏移范围之内的能力。水下机器人如果能实现动态定位,则其工作能力将大大提高。实现手段就是实现位置,姿态的实时反馈控制,利用闭环去抑制动态干扰。鉴于其流体动力学特性的时变,耦合及非线性,这里我们将尝试用滑动控制理论对我们所研制的水下机器人海人一号 HR01 的航向回路进行设计。

由上节讨论知依滑动曲面的定义不同,对应的有 PD 和 PID 算法。并且边界层的厚度 φ 也是可以依式(15)、(16)变化的,以取得更好的控制效果。但从以前的仿真结果来看, φ 时变的作用在起始偏差不大的情况下不是很大,且增加了计算量。这里为了简化算法,保证实时性,取 φ 为固定的,仿真时取 $\varphi = 0.02(\text{rad} / \text{s})$ 。

今用这两种控制规律对 HR01 水下机器人的航向回路设计如下。

参见文献[4]可知 HR01 水下机器人的航向的动力学方程为:

$$(I_{xx} - \frac{1}{2} \rho L^3 p_1) \dot{\varphi}_s + (-\frac{1}{2} \rho L^4 v_R p_2) \dot{\varphi}_s - (\frac{1}{2} \rho L^4 p_3) \dot{v}_s - (\frac{1}{2} \rho L^3 v_R p_4) v_s = N_s \quad (22)$$

其中: I_{xx} 为本体绕 Z 轴的转动惯量; ρ 海水密度; L 为本体的长度; p_1, p_2, p_3, p_4 为流体动力学系数; φ_s 为偏航角; v_s 为侧向速度; N_s 为偏航转矩,包括螺旋桨动力矩及外界扰动力矩; v_R 为基准速度,这里 $v_R = 0.522 \text{m} / \text{s}$ 。

代入具体数据得:

$$468.178 \dot{\varphi}_s + 286.88 \dot{\varphi}_s + 81.783 \dot{v}_s + 94.459 v_s = N_s \quad (23)$$

可见这是关于航向角 φ_x 及侧向速度 v_y 的耦合方程。且是经过线性化的方程。经典线性理论设计方法则必须先设计解耦网络，而这里我们可以将耦合项 $81.783\dot{v}_y + 94.459v_y$ 看做是不可测扰动，不必进行解耦，从而简化了计算量。

取滑动曲面分别为：

$$S = \dot{\varphi}_x + \lambda\bar{\varphi}_x \quad \text{和} \quad S = \dot{\varphi}_x + 2\lambda\bar{\varphi}_x + \lambda^2 \int \bar{\varphi}_x dt$$

这里

$$\bar{\varphi}_x = \varphi_{xd} - \varphi_x$$

期望频率 λ 的选择要慎重。 λ 要远远小于系统的忽略的高频模态。参见文献[1]，我们选 $\lambda = 3.14(\text{rad/s})$ 。

这里对应的 $b(X,t) = 1 / (I_{xx} - \frac{1}{2}\rho L^2 \rho_1)$ ， I_{xx} 可以认为是准确的，只有 ρ_1 是不准确的，则对应的有：

$$\delta = 1 / (I_{xx} - \frac{1}{2}\rho L^2 \hat{\rho}_1) \quad \text{及} \quad \beta = 1 + \frac{1}{2}\rho L^2 \Delta\rho_1 / (I_{xx} - \frac{1}{2}\rho L^2 \hat{\rho}_1)$$

其中 $\delta, \hat{\rho}_1$ 分别是 b, ρ_1 的估计值或观测值。 $\Delta\rho_1$ 为 ρ_1 的测量误差。最后代入具体数值得 $\beta = 1.06$ 。

耦合项做为外扰。取 $v_y = 0.2\text{m/s}$ ， $\dot{v}_y = 0$ ，故扰动量 $d(t) = 18.89\text{kg}\cdot\text{m}$ ，上限 $D(t) = 50\text{kg}\cdot\text{m}$ 。基准速度的变化范围取为 100%，即 $\Delta v_R = v_R = 0.522\text{m/s}$ 而 ρ_2 的不准确性则认为已包括在 Δv_R 中。

仿真时，为模拟螺旋推力的饱和特性，在控制量 u 后加入 3 阈值为 $160\text{kg}\cdot\text{m}$ 的力矩限幅，用以模拟实际的螺旋桨推力特性。

今分别讨论这两种算法对参数变化的鲁棒性，结果如下：对 PID 控制算法，二阶系统时连续控制量

$$\hat{u} = -\hat{f}(X,t) + (\dot{x}_d + 2\lambda\bar{x} + \lambda^2\bar{x}) / \delta(X,t)$$

由于 \hat{u} 引入了位置及速度反馈，即实现了 PD 反馈规律，故起始调整时 \hat{u} 占全部控制量的比例很大，即 u 主要由 \hat{u} 产生。

输入阶跃信号时，由于力矩限幅作用，系统的最大响应速度也受限制。在 $v_R = 0.522\text{m/s}$ 时， $\dot{\varphi}_x \max < 0.56\text{rad/s}$ ，故在轨迹规划时，理想角速度 $\dot{\varphi}_{xd}$ 由一宽度 $\tau = \frac{1}{\varphi_{x\max}} = 1.85$ ，幅值为 $\varphi_{x\max} = 0.56\text{rad/s}$ 的脉冲函数来代替理想脉冲函数。

为验证该方法对参数变化的鲁棒性，今分别对 $v_R = 0.1\text{m/s}$ ， 0.522m/s 及 1m/s 时的对象进行仿真。控制算法不变，则在上述阶跃信号的作用下，系统的响应结果统计如下：

v_R	上升时间 t_r	过渡过程 t_s	超调量 6%	位置响应曲线	控制量曲线
$v_R = 0.1\text{m/s}$	2.8s	4.75s	14%	图 3	图 4
$v_R = 0.522\text{m/s}$	3.25s	3.75s	0.85%	图 5	图 6
$v_R = 1\text{m/s}$	4.5s	4.75s	0.75%	图 7	图 8

由上表可见，在存在饱和和非线性的情况下，尽管参数 v_R 的变化非常剧烈，但系统响应的各项指标变化不大，显示了该方法参数变化的鲁棒性。响应曲线如下：

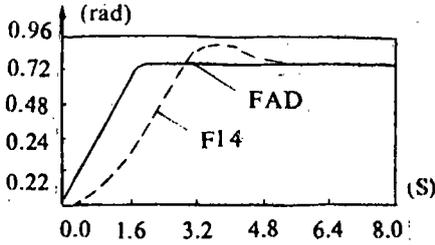


图 3 FAD 为期望位置曲线;F14 为实际响应曲线

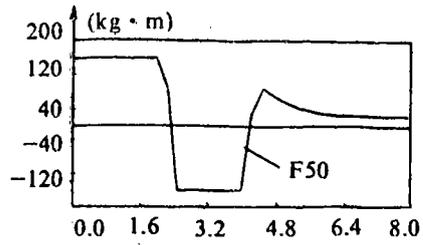


图 4 F50: 螺旋桨推力力矩

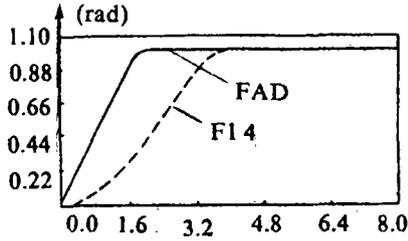


图 5 FAD 为期望位置曲线;F14 为实际响应曲线

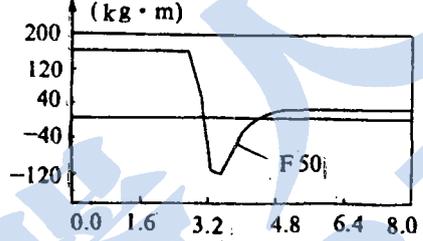


图 6 F50 螺旋桨推力力矩

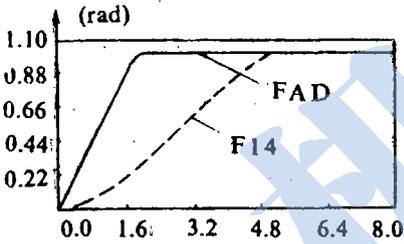


图 7 FAD 为期望位置曲线;F14 实际响应曲线

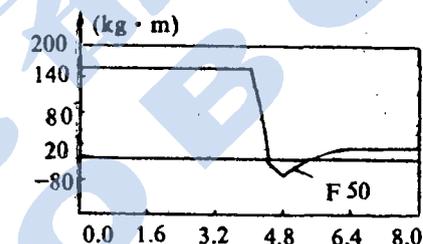


图 8 F50 螺旋桨推力力矩

至于上升时间的变化则是由于力矩限幅的限制及参数变化引起系统响应速度变化而引起的。这相当于在相同力矩作用下，二阶系统的响应速度随阻尼系数的变化而变化，故物理意义相当明显。

为验证对斜坡函数结果，特做了输入为 $1+0.2t$ 的阶跃加斜坡作用的仿真，其结果也是令人满意的，响应曲线及控制量变化曲线如下：

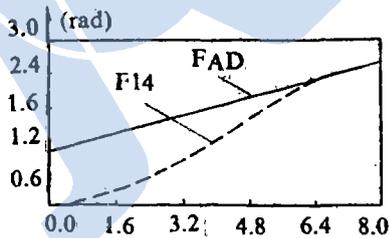


图 9 输入为 $1+0.2t$ 时位置 F14 响应曲线

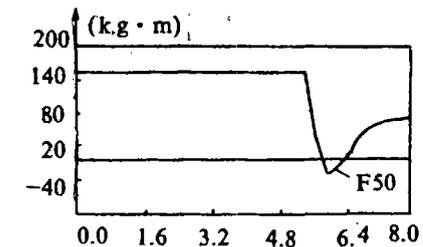


图 10 输入为 $1+0.2t$ 时螺旋桨力矩 F50 响应曲线

对 PD 算法，二阶系统的连续控制量

$$\hat{u} = -\hat{f}(X,t) + (\dot{x}'_d + \lambda \dot{x}'_d) / \hat{b}(X,t)$$

由于 \hat{u} 没有位置偏差项，所以对同样的阶跃信号，系统响应速度明显较 PID 算法慢。参见式(7)可知此时必须加大 $K(X,t)$ 的值，以加快 s^2 的收敛速度。故将 $D(t)$ 由 $50\text{kg} \cdot \text{m}$ 改为 $200\text{kg} \cdot \text{m}$ ，则响应速度明

显加快。

为验证该算法对参数变化的鲁棒性，在输入信号取为与PID算法相同的阶跃信号下，对 $v_R = 0.1\text{m/s}$ 、 0.522m/s 和 1m/s 的对象进行仿真，控制算法及参数保持不变，得下表所示结果。

v_R	上升时间 t_r	过渡过程 t_s	超调量 6%	位置曲线	控制力矩曲线
0.1m/s	3.25s	3.5s	无	图 11	图 12
0.522m/s	4.75s	5.3s	无	图 13	图 14
1m/s	6.8s	6.8s	无	图 15	图 16

可见在 v_R 大幅度变化时，虽然存在饱和和非线性的影响，但系统的超调量基本没有变化，这一点是难能可贵的，充分显示出该方法对参数变化的鲁棒性。

最后又对输入为 $1+0.2t$ 的阶跃加斜坡信号做了系统仿真实验，其结果也是令人满意的，此时取 $v_R = 0.522\text{m/s}$ ，响应曲线及控制量曲线如图 17 及图 18 所示。

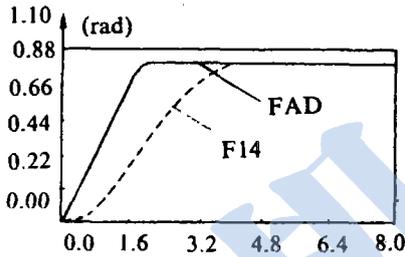


图 11 FAD 为期望位置曲线;F14 为实际响应曲线

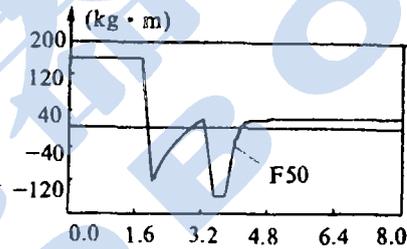


图 12 螺旋桨力矩 F50

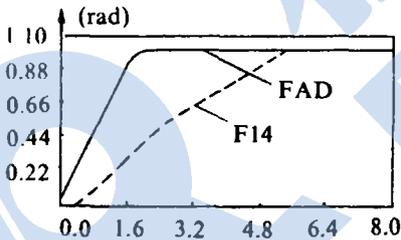


图 13 FAD 为期望位置曲线;F14 为实际响应曲线

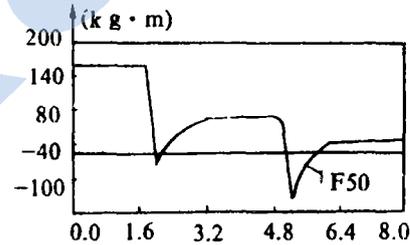


图 14 螺旋桨力矩 F50

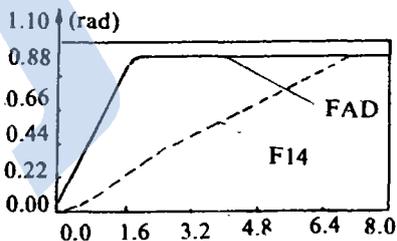


图 15 FAD 为期望位置曲线;F14 为实际响应曲线

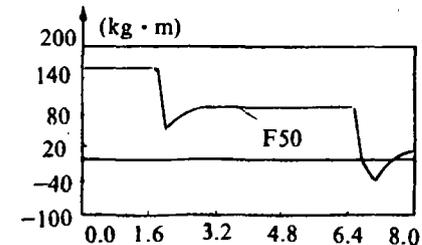
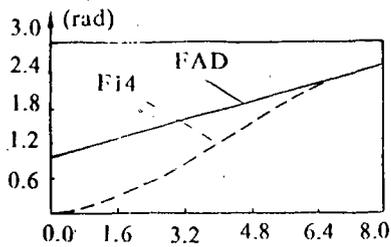
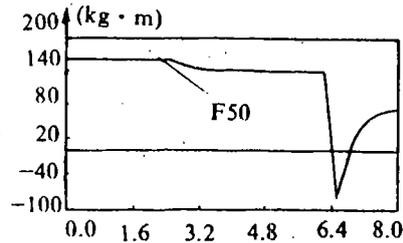


图 16 螺旋桨力矩 F50

图 17 输入为 $1+0.2t$ 时, 位置 F14 响应曲线图 18 输入为 $1+0.2t$ 时, 螺旋桨力矩 F50 响应曲线

综上所述, 该两种方法对系统参数的时变都具有较强的鲁棒性。在参数大幅度变化时, 能保证控制效果基本不受影响。即使是存在着饱和和非线性特性时, 系统响应仍是相当令人满意的, 故该理论对水下机器人的动态定位系统设计来说是一种有着光明前景的好方法, 相信不久会得到实际应用。

参 考 文 献

- 1 Asada H A, Slotine J J E. Robot analysis and control. John Wiley and Sons, Inc, 1986
- 2 Slotine J J E, Yoeger D R. Robust trajectory control of underwater vehicles. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1985; 10(4): 462-470
- 3 安宏声. 水下机器人动态定位系统的研究, 中国科学院沈阳自动化研究所, 1988. 硕士论文
- 4 安宏声, 蒋新松, 李俊鹏. 滑动控制理论在海洋机器人航向控制中的应用. 东北三省自动化学会年会, 1987年. 齐齐哈尔
- 5 Slotine J J E. The robust control of robot manipulators. Inter National Journal of Robotics Research, 1985; 4(2)
- 6 Morgan M J. Dynamic positioning of offshore vessels. Tulsa, OK: Petroleum, 1978
- 7 李俊鹏等. 海洋机器人的闭环控制与流体动力学模型. 机器人, 1987; 1(1): 50-56
- 8 Slotine J J E. Supervisory control of underwater vehicles. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1985; 11(3)

APPLICATION OF SLIDING CONTROL THEORY DYNAMIC POSITIONING SYSTEM DESIGN OF AN UNDERWATER VEHICLE

AN Hongsheng JIANG Xinsong

(Shenyang Institute of Automation, Academia Sinica)

Abstract

This paper introduces a newly developed robust control method—sliding control theory and presents its application in the design of a dynamic positioning system of an underwater vehicle. The simulation results show that this method is effective and successful with strong robustness to parameter perturbations.

Keywords: sliding control theory, underwater vehicle, dynamic positioning system.