

文章编号: 1002-0411(2005)03-0360-05

## 一种新的仿人控制方法研究

汤士华<sup>1,2</sup>, 李一平<sup>1</sup>, 李 硕<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**以模拟人对混水阀的调节过程为基础,提出一种新的仿人控制算法.该控制算法模拟人在控制时的粗调和微调,并使控制量逐步逼近最终稳定控制量的过程.算法中的参数具有明确的物理意义,可根据不同的控制指标方便地调节,并且能够获得足够的稳态误差.采用本文控制算法,不需要有精确的被控对象模型,即使在有较大干扰的情况下,仍可以获得较好的控制性能.

**关键词:** AUV; PID 控制; 仿人智能控制

中图分类号: TP18

文献标识码: B

### Research on a New Human Simulating Intelligent Control Method

TANG Shi-hua<sup>1,2</sup>, LI Yi-ping<sup>1</sup>, LI Shuo<sup>1</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** This paper presents a new intelligent control method, which simulates the process of human controlling a mixed-water valve. The control method adopts different control variables at different regulating time, which is similar to human's macro-regulating and micro-regulating process, and each control variable approaches to a constant at last. The parameters in this method have specific physical meaning and it is convenient to adjust them according to different control indexes. With this control algorithm, it is not necessary to know the precise model of the controlled objects, and good performance can be achieved even with heavy interference.

**Keywords:** AUV (autonomous underwater vehicle); PID control; human simulating intelligent control (HSIC)

### 1 引言 (Introduction)

在智能控制领域中,仿人智能控制具有重要地位,无数事实表明,最高级最有效的控制系统是人类自身<sup>[1]</sup>.目前,在仿人智能控制研究中,人们普遍使用重庆大学周其鉴等人提出的仿人智能控制(HSIC)算法<sup>[2]</sup>.HSIC本身是针对纯滞后和容量滞后的控制算法,它特别适用带纯滞后的一阶惯性环节,其算法思想本身仍然存在缺陷<sup>[3]</sup>.可是,实际的控制系统并非都是带纯滞后的一阶惯性环节,对于机器人这样的复杂系统,获得的模型可能只是近似模型,模型参数也可能是时变的,此时,传统PID和HSIC算法可能无法满足控制要求.因此,若要对机器人这类复杂系统实施仿人控制,获得好的控制效果,就要对人的控制行为进行重新模拟,以补充原HSIC,并期望获得适应性更广泛的HSIC.

基于以上目的,本文通过对人调节混水阀过程

的模拟,提出一种新的仿人控制算法,并对一个AUV对象进行了仿真,其仿真结果证明这种控制思想或控制器的设计是成立的,并且在模型不精确且有干扰存在时,仍可获得较好的控制效果.

### 2 问题的描述和设计思想 (Problem description and design idea)

下面以人用混水阀调节水温的过程为例来说明本控制算法.人首先根据初始偏差给出初始控制量,然后通过皮肤(相当于传感器)将水温信息传递给大脑(相当于决策器),大脑对信息进行处理,最后决定增大、减小控制量以及增大、减小的幅度.其基本决策过程为:如果水温低,则增大热水控制量;反之,如果水温高,则减小热水控制量(假设冷水的出水量恒定).因此,人通过皮肤获得的基本信息就是偏差,人的这种控制策略就是基于偏差的增量式调节.经过以上分析,我们有下面的仿人控制策略.

基本控制信息为偏差  $e[k]$ ,基本控制率为增量式调节,即控制量:  $u[k] = u[k-1] + \Delta u[k]$  ( $\Delta u[k]$ 为控制量增量).  $\Delta u[k]$ 是这样给定的:当  $e[k] > 0$ 时,人会将控制量增大;当  $e[k] < 0$ 时,人会将控制量减小,即:  $\Delta u = \text{sgn}(e[k]) \cdot |\cdot|$ .其中:  $\text{sgn}(\cdot)$ 是符号函数,  $|\cdot|$ 表示增量的大小.另一方面,人在发现偏差大时就应该给出大的控制量增量,以使偏差尽快减小;当偏差减小到一定的程度时,又不能频繁地增大,减小控制量,否则被控对象的输出将随控制量的增大,减小而波动.所以当偏差大时控制量的改变应很大,是一个粗调过程,当偏差小时控制量的改变应很小,是一个微调过程(以上两点分别对应于上升时间和稳态误差两个指标).那么,控制量增量可描述为:  $\Delta u[k] = \text{sgn}(e[k]) \cdot f_d(|e[k]|)$ ,其中  $y = f_d(x)$ 称为强度函数,它有图 1 的形式.

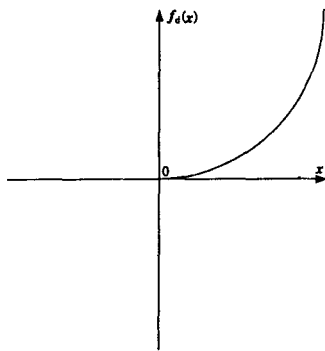


Fig. 1 Intensity function

将  $y = f_d(x)$ 设计成如图 1 的形式,其目的是为了模拟人的上述粗调过程和微调过程.其数学描述为:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f_d(x)}{x} = \infty \tag{1}$$

因此  $y = f_d(x)$ 可以是幂函数  $kx^\alpha$  ( $k > 0, \alpha > 1$ )或指数函数  $ke^{\lambda x}$  ( $k > 0, \lambda > 0$ )等.为了减小稳态误差,提高控制精度,模拟人的微调过程,将偏差放缩,即将偏差先归一化再乘以一个缩放系数  $k_c$ ;同时为了使输出能够尽快响应输入,在这里将控制量的改变也先归一化然后乘以一个调节  $\Delta u$ 的比例因子  $k_u$ ,那么控制率可以表述为:

$$u[k] = u[k-1] + \text{sgn}(e[k]) \cdot k_u R \cdot f_d(|k_c e[k]| / R) \tag{2}$$

在 (2)式中  $R$ 为给定期望目标.考虑到实际应用中的控制量和执行机构的饱和现象,对 (2)式的更接近实际的描述为:

$$u[k] = u[k-1] + \text{sgn}(e[k]) \cdot k_u R \cdot f_d(k_c |f(k_c e[k]| / R)|) \tag{3}$$

其中  $k_c$  ( $k_c > 0$ )用来规范偏差变化的范围,即将归一化的偏差规范在  $[-k_c, k_c]$ .  $f(x)$ 为饱和函数,其函数关系为:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & (x > 1) \\ x & (-1 \leq x \leq 1) \\ -1 & (x < -1) \end{cases} \tag{4}$$

同时,人在初始时会根据初始偏差给出初始控制量  $u_0$ ,  $u_0$ 对于上升时间和超调量有影响,  $u_0$ 大,则上升时间短,但可能引起超调或增大超调;  $u_0$ 小,则上升时间长,可能没有超调.那么,总的控制率可表述为:

$$u(k) = u_0 \quad (\text{初始控制量})$$

$$u[k] = u[k-1] + \text{sgn}(e[k]) \cdot k_u R \cdot f_d(k_c \cdot |f(k_c e[k]| / R)|) \quad (\text{其它控制量}) \tag{5}$$

### 3 仿真研究 (Simulation research)

利用现有 AUV模型作为被控对象,对上述控制思想进行研究.为了简化计算使用线性模型,并假设机器人的纵向速度不变,忽略非线性水动力项,不考虑水平面和垂直面间的耦合.这里给出水平面转矩使机器人产生水平面转动的传递函数:

$$G(s) = \frac{r}{u} = \frac{0.0075(s + 0.25)}{(s + 1.548)(s + 0.472)} \tag{6}$$

其中,  $u$ :推力器产生的水平推力矩;  $r$ :机器人的航向角.可以看出该模型是一个二阶系统,它也代表了大多数的单输入单输出控制系统.对该对象进行  $T = 100\text{ms}$ 的采样,然后通过零阶保持器保持,得到对象的差分方程如下:

$$y[k] = A_3 y[k-1] - A_4 y[k-2] + A_1 u[k-1] - A_2 u[k-2] \tag{7}$$

其中:  $A_1 = 0.000687$ ,  $A_2 = 0.000670$ ,  $A_3 = 1.810483$ ,  $A_4 = 0.817095$ ,  $y[k]$ 为被控对象的输出.给出 (5)式的控制率,强度函数设计成如 (8)式所示:

$$f_d(x) = kx^2 \quad (k = 0.0001) \tag{8}$$

(8)式将  $k$ 设计很小的目的是为了当归一化偏差小时,给出的控制量也小,以模拟人的微调过程.饱和函数  $f(x)$ 取 (4)式的函数.期望  $R = 100$ ,调节控制器参数如下:

$$k_c = 15, \quad k_u = 1, \quad k_0 = 8000 \tag{9}$$

在上述控制器参数和目标期望下的 0~150个周期内的闭环控制曲线如图 2 中 2-1 所示.其主要时域性能指标为:

绝对误差 :0.869264 (第 150T时)

超调量 :4.407771

上升时间 :9T

在此基础上,不改变控制器任何参数,对原系统增加一阶纯延时,得到 0~150个周期内的闭环控制曲线如图 2中 2-2所示.其主要时域性能指标为:

绝对误差 :0.866237 (第 150T时)

超调量 :4.955006

上升时间 :10T

可以看出,控制器仍然能较好地工作,说明它可以较好地抵抗延时所带来的不利影响,同时也说明,在对象模型不很精确的条件下该控制算法仍可较好对被控对象实施控制.在此基础上,仍不改变控制器的任何参数,对其进行抗干扰实验曲线

1) 在输入端增加干扰.

干扰加在第 30~60个周期,干扰大小为 100% R 下获得的阶跃响应曲线,如图 2中 2-3所示.

2) 在输出端增加干扰.

干扰加在第 30个周期,持续一个周期,干扰大小为 20% R期望下获得的阶跃响应曲线如图 2中 2-4所示.

从图 2可以看出,本控制器能够抵抗强烈的输入端干扰,也可以抵抗一定的输出端干扰.输出端干扰相当于传感器数据有偏差或错误.通过进一步实验证明,当继续增大干扰时,控制器仍然能够抵抗输入端和输出端干扰,但是,如果干扰太大,将增大闭环控制过程中大的超调.

通过以上实验说明,该控制器在控制模型精确时,可以获得满意的控制效果.当被控对象模型不十分精确时,仍然可以获得较好的控制效果,并且对输入端和输出端的干扰有一定的抵抗作用,因此,本控制器是一种较好的鲁棒控制器.

#### 4 参数对控制器性能的影响和控制算法的比较 (Effect of parameters on system performance and comparison among different control methods)

对象为 (6)式,程度函数为 (8)式,给定的期望大小为  $R=100$ .调节本控制器参数,得到参数对控制器性能的影响如表 1所示.

Fig. 2 Response curves under different conditions

表 1 各参数对控制性能的影响

Tab. 1 Effect of various parameters on system performance

控制器参数			(0, 200T) 的曲线	暂态性能		稳态性能 (%)		
$k_c$	$k_i$	$k_d$		上升时间 (T)	超调量 (%)	$e[200T]$	$e[500T]$	$e[900T]$
10	1	$1.0 \times 10^4$	图 3(a) (3-1)	9	4.201084	3.467032	1.071127	0.524790
10	1	$6.0 \times 10^4$	图 3(a) (3-2)	8	12.416589	1.043197	0.225463	0.098109
10	1	$1.0 \times 10^5$	-	7	15.805767	0.753008	0.145167	0.060818
10	1	$2.0 \times 10^5$	-	6	21.999397	0.485879	0.079991	0.031760
10	1	$4.0 \times 10^5$	-	5	28.780596	0.320331	0.044493	0.016624
10	1	$1.0 \times 10^6$	-	4	38.187384	0.188722	0.020764	0.007081
10	1	$4.0 \times 10^6$	图 3(b)	3	65.500162	0.089608	0.006855	0.001966
1	1	$2.0 \times 10^5$	图 4(a) (4-1)	8	12.184565	8.713859	3.925174	2.213287
10	1	$2.0 \times 10^5$	图 4(a) (4-2)	6	21.999397	0.485879	0.079991	0.031760
100	1	$2.0 \times 10^5$	-	6	20.802933	0.038475	0.002012	0.000448
500	1	$2.0 \times 10^5$	图 4(b)	6	20.802933	0.788068	0.490682	0.490682

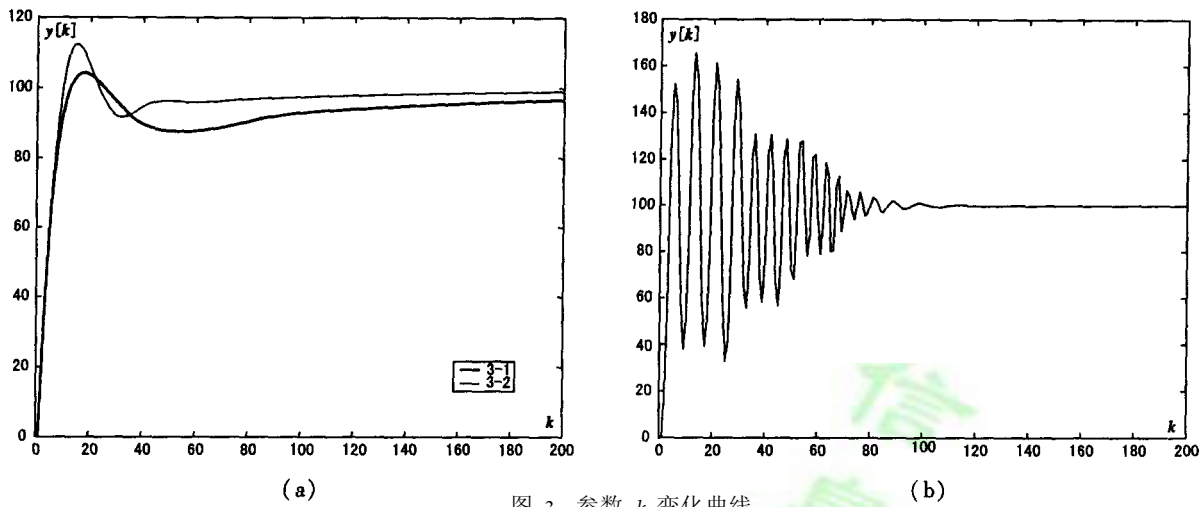


图 3 参数  $k_u$  变化曲线  
Fig. 3 Curves of parameter  $k_u$

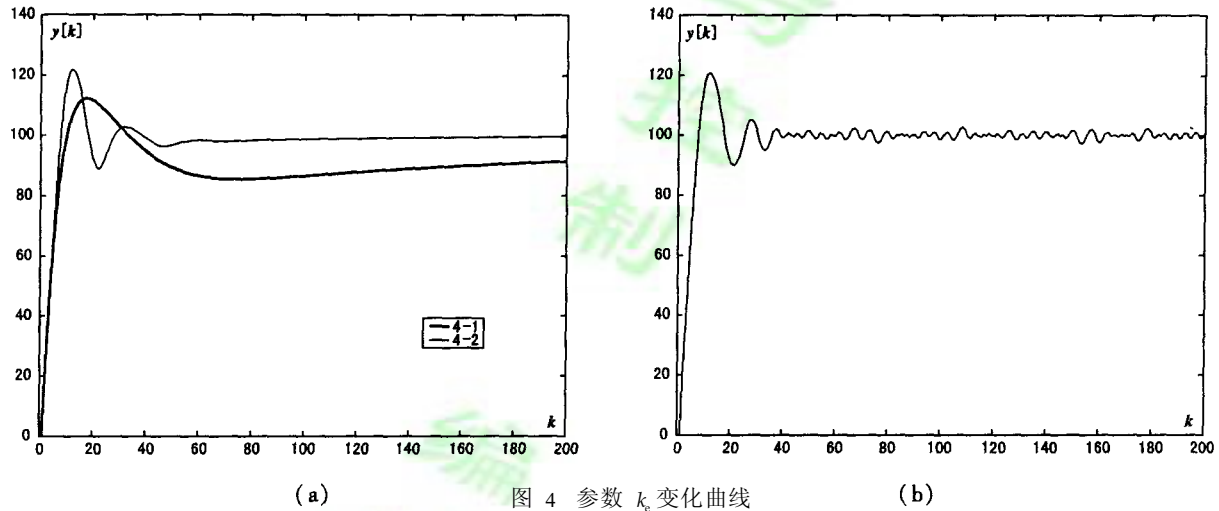


图 4 参数  $k_c$  变化曲线  
Fig. 4 Curves of parameter  $k_c$

从表 1 可以看出:增大  $k_u$  能够减小上升时间和快速进入稳态,并能够降低稳态误差,但同时也增大了超调量.当  $k_u$  增大到很大时,系统将长时间地振荡,最后进入稳态,当然,它也有大的超调和小的上升时间以及小的稳态误差.这正如表 1 中的给定参数为  $(10, 1, 4.0 \times 10^6)$ .增大  $k_c$  也能够减小上升时间,但它的作用很小,  $k_c$  的主要作用是提高误差的分辨率,从而可以将小的误差变化反映在小的控制

量改变上,以此来提高系统的精度.但同时,如果  $k_c$  很大,那么一个很小的误差变化将被放大到较大,那么导致控制量的改变也将较大,其结果表现为在进入稳态以后将出现纹波,这正如表 1 中参数给定  $(500, 1, 2.0 \times 10^5)$ .因此,  $k_u$  的主要功能是减小上升时间,  $k_c$  的主要功能是减小稳态误差.

本算法与 PID 算法和文献 [1] 中 HSIC 算法比较如表 2 所示.

表 2 各控制方案的比较

Tab. 2 The comparison among various control methods

控制器类型	控制器参数	(0, 200T)的曲线图	上升时间 (T)	超调量 (%)	稳态性能 (% e[200T])
PID 控制器	$k_p = 200, k_i = 300, k_d = 1$	图 5(5-1)	9	4.926925	0.069484
文献 [1] HSIC	$k_p = 220, k_u = 0.3$	图 5(5-2)	9	14.605324	0.061251
本文 HSIC	$k_c = 1100, k_c = 1, k_u = 4.7 \times 10^4$	图 5(5-3)	9	2.785526	0.007221

从表 2 可以看出:在上升时间一样的情况下,本控制算法能够获得小的超调量和小的稳态误差.由于本控制算法是基于偏差的增量式调节,因此本控制器的收敛速度比其它两种控制算法都快.

同时,有如 (10) 式的误差函数,其中的参数和函数如前所描述.从 (10) 式可以看出,这是一个关于误差  $e[k]$  的自迭代式.要严格证明只要给出合适的控制器参数  $k_0$ 、 $k_c$ 、 $k_i$  就能使  $e[k]$  收敛于 0,这将是一件困难的事情,但通过计算机仿真可以说明可以很容易地找到控制器参数  $k_0$ 、 $k_c$ 、 $k_i$  使  $e[k]$  收敛于 0,也就是说,随着时间的推移,本控制算法将获得足够的精度.不同控制器作用下的阶跃响应曲线

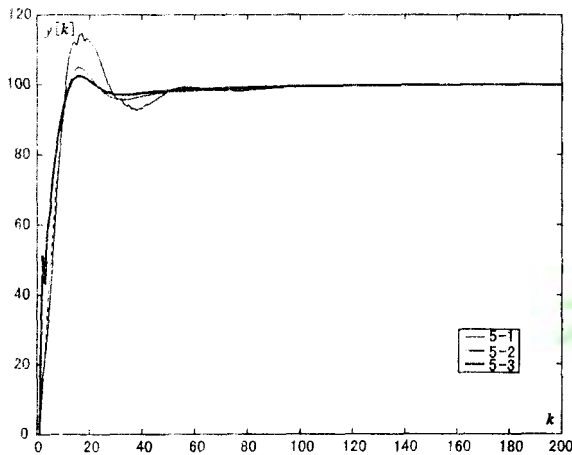


Fig. 5 Step responses of different controllers

$$\begin{aligned}
 e[0] &= R; e[1] = R - A_1 u_0 \\
 e[2] &= R - (A_1 + A_1 A_3 - A_2) u_0 - A_1 \operatorname{sgn}(e[1]) \cdot \\
 &\quad k_i R f_i(|k_c f(k_c e[1]/R)|) \\
 a &= A_2 \operatorname{sgn}(e[k-1]) k_i R f_i \\
 &\quad (|k_c f(k_c e[k-1]/R)|) \\
 b &= A_3 \operatorname{sgn}(e[k]) k_i R f_i(|k_c f(k_c e[k]/R)|) \\
 e[k+1] &= (1 + A_3) e[k] - (A_3 + A_4) \cdot \\
 &\quad e[k-1] + A_4 e[k-2] + a - b
 \end{aligned} \tag{10}$$

## 5 结论 (Conclusion)

本文以模拟人对混水阀的调节过程为基础,提出一种新的仿人控制算法.该控制算法分别模拟人

在控制时的粗调和微调并使控制量逐步逼近最终稳定控制量的过程,同时,本文给出了控制器参数对控制性能的影响,并且通过实验验证该控制算法能够抵抗一定的延时和干扰带来的不利影响,不需要调整控制器参数仍能获得较好的控制效果.

当然,传统 HSIC 的改进算法有许多,如与模糊、神经网络等的结合.因此本基本控制算法也可类似衍生出许多改进算法.对于本控制算法改进,如强度函数改为  $e^{\lambda x}$  ( $\lambda > 0$ ) 等,或将强度函数离散化以分段函数代替,通过仿真证明都是可以的.对于本算法的抗干扰性,当加入随机扰动或被控对象的参数在一定范围内变化时,控制器仍然可获得较好的控制效果.需要说明的是,本文仿人控制算法完全来源于人对现实生活对象的控制过程的模拟,参数具有明确的物理意义,同时,通过计算机仿真可以看出本算法能够获得很高的精度,当然它仍要以牺牲较长的时间为代价.

## 参 考 文 献 (References)

- [1] 王俊普. 智能控制 [M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1996. 177 ~ 178.
- [2] Zhou Q J, Bai J G. An intelligent controller of novel design [A]. Proceedings of a Multinational Instrument Conference [C]. Shanghai: 1983. 37 ~ 149.
- [3] 章 兢. 仿人智能控制与模糊控制神经网络融合技术 [J]. 控制与决策, 1999, 14(5): 428 ~ 432.
- [4] Qing C C. The Human Simulating Intelligent Control Study of Inverted Pendulum System [D]. Chongqing: Chongqing University, 1997.
- [5] 陈 众, 颜 伟, 等. 基于 HSIC 的非线性 PID 控制器 [J]. 控制与决策, 2003, 18(6): 694 ~ 697.
- [6] 张世玺, 杨 平, 等. 仿人智能积分控制算法改进研究 [J]. 上海电力学院学报, 2003, 19(1): 47 ~ 49.
- [7] 杨 志, 等. 基于仿人智能的复杂关联系统控制 [J]. 重庆大学学报, 2002, 25(7): 9 ~ 11.

## 作者简介

汤士华 (1979 - ), 男, 硕士研究生. 研究领域为视觉伺服控制, 智能控制.

李一平 (1963 - ), 女, 副研究员. 研究领域为水下机器人技术等.

李 硕 (1970 - ), 男, 副研究员. 研究领域为水下机器人技术等.