

基于混合灵敏度的水下机器人鲁棒控制研究*

赵浩泉^{1,2,3}, 封锡盛¹, 刘开周¹

(1 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室 沈阳 110016;

2 中国科学院研究生院 北京 100039; 3 海司航保部 天津 300032)

摘要: 为了使水下机器人(AUV, autonomous underwater vehicle)在多环节不确定条件下满足水下作业时动力定位的控制精度要求,深入研究了混合灵敏度鲁棒控制中各加权函数的选取原则后,设计了基于混合灵敏度的 AUV 鲁棒控制器。通过 AUV 半物理仿真平台上的动力定位试验和控制算法对比试验,证明了所设计的鲁棒控制器对于水下机器人系统的外界扰动和参数变化不确定性具有良好的抑制作用,控制效果令人鼓舞。

关键词: 水下机器人; 动力定位; 鲁棒控制; 混合灵敏度; 加权函数

Research on the mixed sensitive robust control of AUV

Zhao Haoquan^{1,2,3}, Feng Xisheng¹, Liu Kaizhou¹

(1 Shenyang Institute of Automation, CAS, Shenyang 110016, China;

2 Graduate School Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3 Department of Navy Headquarters, Navigation Guarantee, Tianjin 300032, China)

Abstract: In order to fulfill high accurately control of AUV' dynamic positioning on the condition of multiple uncertainties, the principle of each weight function wa deeply researched. Based on the mixed sensitive theory, a robust controller was designed for deep sea AUV. Dynamic positioning test and comparison test between difference control algorism were carried out on the semi-physical simulation platform. The results showed that the controller designed took effect on the disturbance and parameter changing of AUV.

Key words: AUV(autonomous underwater vehicle); DP(dynamic positioning); robust control; mixed sensitive; weighted function

1 引言

潜艇作为海军最重要的作战武器之一,其沉没对于海军作战部队无论是经济上还是士气上都是一个沉重的打击。因此世界各个军事强国对于失事潜艇的打捞、救助都极为重视。目前,AUV已经广泛应用于海洋的矿产资源调查、海洋石油开采、水下工程施工、深海生物种群调查等诸多方面,已经产生了巨大的经济效益和社会效益,在打捞与救助也具有广泛的应用前景。因此,AUV的载体及控制技术成为美、俄、法、日等世界各国投巨资

争相研究的热点^[1]。AUV是一个具有各个自由度强耦合、系统参数时变、大惯性、纯滞后、多输入多输出等特点的非线性系统。由于存在海洋环境的不确定性、系统参数时变的不确定性、以及传感器的不确定性等^[2-3],加上系统实时性方面的考虑,通常的控制方法很难对其实时控制或很难得到理想的控制效果,因此需要对可克服 AUV 系统多环节不确定性的底层控制进行深入研究。

与传统的控制方法相比,以系统无穷范数为性能指标的 H_{∞} 鲁棒控制理论是目前解决多环节不确定性问题比较成熟的理论体系,已成为自动控制理论及工程应用研究的热门课题之一。Jong Hae Kim, Kap Rai Lee

* 基金项目:中科院先进制造基地创新课题基金(F990406)资助项目

等^[2-3]进行了区域极点配置的 H_2 、 H_∞ 混合鲁棒控制研究,所设计的控制器可以有效克服系统水动力、时间延迟、外界扰动等不确定性;Cedric Logan^[4]比较了 H_∞ 鲁棒控制、 μ 和滑模控制对一种小型水下机器人的深度、航向两自由度的控制效果。

文章首先建立 AUV 的数学模型,然后简述基于混合灵敏度的 H_∞ 鲁棒控制理论,然后基于 H_∞ 混合灵敏度鲁棒控制原理为 AUV 设计了鲁棒控制器,在给出在多功能仿真平台上的试验结果后给出结论。

2 AUV 控制系统数学模型

AUV 控制系统不但应该具有良好的稳定性,而且还需具有良好的快速性和较小的稳态误差。由于 AUV 开环系统的带宽很低,导致系统阶跃响应十分缓慢。以水平面内航向角为例,依据水下机器人动力学模型可推出其传递函数:

$$G_n(s) = \frac{(m - Y_{\dot{v}})s - Y_v}{A_2 s^2 + A_1 s + A_0} \quad (1)$$

式中: m ——AUV 的质量;

$Y_{\dot{v}}$ ——AUV 的水动力系数;

$N_{\dot{v}}$ ——AUV 的水动力系数;

$A_2 = (m - Y_{\dot{v}})(I_z - N_r) - Y_r V_{\dot{v}}$;

$A_1 = -N_r(m - Y_{\dot{v}}) - Y_v(I_z - N_r) + Y_r N_v + N_v Y_r$;

$A_0 = Y_v N_r - Y_r N_v$ 。

以下如不特殊说明,均对航向角进行 H_∞ 鲁棒控制器设计。

3 鲁棒控制原理

3.1 混合灵敏度鲁棒控制

H_∞ 控制理论中的混合灵敏度设计方法作为一种鲁棒性设计方法,能弥补现代控制理论对数学模型的过分依赖,在设计过程中考虑了对象模型的不确定性,兼顾了系统的瞬态性能、抗干扰能力及鲁棒性,既可抑制干扰对控制误差的影响,又有一定的鲁棒稳定性,可抑制对象不确定性对系统的影响。它基于频率特性的回路整形原理,采用加权函数对干扰抑制和鲁棒性能等要求进行处理从而得到增广被控对象,对于此增广被控对象设计反馈控制器 $K(s)$,使得闭环系统内部稳定且 $\|T_{zw}\|_\infty < 1$,即混合灵敏度设计问题可最终转化为一个标准 H_∞ 控制器设计问题。混合灵敏度设计问题可用图 1 所示的系统来表述。

图中 u 是控制信号; y 是输出信号; d 为噪声信号和干扰信号的集合; $z = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$ 是设计需要而定义的评价信号; $W_1(s)$ 为抑制噪声和干扰对控制误差的影响

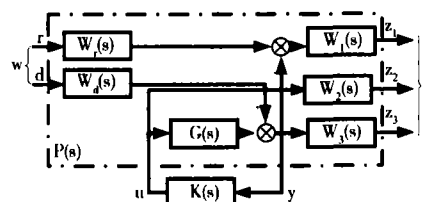


图 1 增广被控对象

而引入的加权函数; $W_2(s)$ 为抑制控制输入过大而引入的加权函数; $W_3(s)$ 为满足鲁棒稳定性而引入的加权函数; $P(s)$ 为增广的对象模型。

定义:

$$S = (I + GK)^{-1}$$

$$R = K(I + GK)^{-1} \quad (2)$$

$$T = GK(I + GK)^{-1}$$

式中: S ——灵敏度函数;

T ——补灵敏度函数。

混合灵敏度设计问题就是寻找正则有理的控制器 $K(s)$,使图 1 所示的控制系统闭环稳定,且满足:

$$\|T_{zw}\|_\infty \triangleq \left\| \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_2 R \\ W_3 T \end{bmatrix} \right\|_\infty \leq 1 \quad (3)$$

3.2 加权函数的选择

采用 H_∞ 理论进行鲁棒控制器设计的核心在于加权函数的选择,加权函数的选取对设计起着决定性的作用。引进加权函数是为了使构造的优化问题在数学上更容易处理,从优化角度来说,系统的性能,即鲁棒稳定性和鲁棒性能取决于加权函数的选择。加权函数的选择是 H_∞ 理论在实际应用中的一个难题。

在 AUV 控制器设计中,性能加权函数 $W_1(s)$ 、控制器输出加权函数 $W_2(s)$ 、模型摄动加权函数 $W_3(s)$ 、跟踪输入加权函数 $W_r(s)$ 和扰动输入加权函数 $W_d(s)$ 的选择可根据 AUV 系统性能要求来决定。总的来讲,上述加权函数的选择需满足以下要求:

1、为了保证加权函数的引入不影响系统本身的稳定性,一般要求选择的加权函数稳定且是最小相位的,即

$$W_i \in RH_\infty \text{ 且 } W_i^{-1} \in RH_\infty$$

2、由于 H_∞ 控制器的阶数等于被控对象与加权函数阶数之和,因此,为了便于控制器的实际运用,得到低阶次控制器,在保证设计要求的前提下,应尽可能选择低阶次的加权函数。

具体来讲,各加权函数的选择需遵循下述原则:

1、性能加权函数 $W_1(s)$ 反映系统跟踪性能和扰动抑制性能。在截止频率以下的低频段,为了有效地抑制扰动的影响和精确地跟踪输入信号, $W_1(s)$ 的直流增益 k_1 尽可能大。 b_1 要小于期望截止频率 ω_c 2~3 个频段。 a_1

则要略大于 ω_c 。对超出系统截止频率的高频段,则无严格要求。因此,一般 $W_1(s)$ 应具有一积分特性或低通特性。

$$W_1(s) = k_1 \frac{\frac{s}{a_1} + 1}{\frac{s}{b_1} + 1} \quad (4)$$

2、控制器输出加权函数 $W_2(s)$ 应覆盖被控对象的不确定性,应具有高通性质。

3、模型摄动加权函数 $W_3(s)$ 反映了对模型参数摄动的抑制能力。设计该加权函数时,在截止频率 ω_c 以下低频段的增益一般较低,在高频域段上应尽量抬高摄动加权函数的增益以抑制高频的信号的影响。因此, $W_3(s)$ 的直流增益 k_3 不能太大, a_3 与 a_1 选取原则一样,需略大于 ω_c , b_3 要大于期望截止频率 ω_c 1~2 个频段。

$$W_3(s) = k_3 \frac{\frac{s}{a_3} + 1}{\frac{s}{b_3} + 1} \quad (5)$$

4、跟踪输入信号加权函数 $W_r(s)$ 和扰动信号权函数 $W_d(s)$ 的选择分别根据跟踪信号和扰动信号的性质。 $W_r(s)$ 通常选为常值或者低通滤波器, $W_d(s)$ 通常选为常值或者高通滤波器。

4 基于 H_∞ 混合灵敏度的 AUV 控制器设计

为了使 AUV 控制系统满足稳定性和快速性方面的要求,而且对 AUV 模型的不确定性起到一定的抑制作用,本节采用混合灵敏度鲁棒控制设计方法,使控制系统

$$A_k = \begin{bmatrix} 0.2796 & 3.116 & 1.405 & -294.5 & 138 \\ 0.06832 & 0.6463 & -0.1585 & 33.14 & -15.53 \\ 0.0224 & -0.07113 & 0.9613 & 9.021 & -4.227 \\ -0.0004599 & 0.004704 & 0.002279 & 0.4961 & 0.2347 \\ 0.0003811 & -0.00093 & -0.0004065 & 0.4995 & -0.501 \end{bmatrix}$$

$$B_k = [78.39 \quad -8.824 \quad -2.402 \quad -0.3033 \quad -0.05853]^T$$

$$C_k = [-226.6 \quad 1.013 \quad 45.707 \quad -9.616e4 \quad 4.506e4]$$

$$D_k = [2.56e4]$$

其传递函数为:

$$K_h(z) = \frac{25599.6572(z+1)(z-1)(z-0.9917)(z-0.9813)(z+0.04099)}{(z+0.8755)(z-0.8195)(z-0.9918)(z-1)(z+0.05326)} \quad (9)$$

控制器特征多项式的根分别为:

$$[-0.8755 \quad -0.0533 \quad 0.8195 \quad 0.9998 \quad 0.9918]$$

均位于单位圆内,因此所设计的控制器稳定。在该控制器作用下,得到的鲁棒性指标为:

$$\gamma = 0.6$$

5 实验研究

为了保证 AUV 现场湖试和海试的安全性,降低系

达到闭环系统鲁棒稳定、系统响应速度快、满足鲁棒性能。

将 AUV 在纵向速度为 1 节时作为平衡点展开,建立其线性状态空间模型。由于系统阶次较高($n=12$),再加上 6 个自由度上的扰动输入、传感器噪声等输入、鲁棒性能输出、控制量输出、鲁棒稳定性输出和测量输出信号,增广的 AUV 被控对象将是个非常庞大的状态空间系统。因此这里采用各自由度独立设计鲁棒控制器方法。以航向角为例,选取 $W_{1h}(s)$ 和 $W_{3h}(s)$ 加权函数,得到增广被控对象状态空间矩阵 P_h 。

$$P_h = \begin{bmatrix} W_{1h} & -W_{1h}G_h \\ 0 & W_{3h}G_h \\ I & -G_h \end{bmatrix} \quad (6)$$

得到的 P_h 为 5 个状态、2 输入 3 输出的状态空间系统。

$$P_h = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (7)$$

参考某型飞机的加权函数形式,经过反复调整和验证,AUV 在 ξ 、 η 、 ζ 和 ψ 4 个自由度选择的加权函数分别为对系统 P_h 进行 H_∞ 鲁棒控制器综合设计,得到与 P_h 相同阶次的 H_∞ 控制器 K_h ,其多功能仿真平台 AUV 中采用离散化后的状态空间形式。

$$K_h = \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:

$$\begin{bmatrix} -294.5 & 138 \\ 33.14 & -15.53 \\ 9.021 & -4.227 \\ 0.4961 & 0.2347 \\ 0.4995 & -0.501 \end{bmatrix}$$

统现场试验的风险,建立了如图 2 所示的半物理仿真平台^[5]。由于该平台的 AP 计算机硬件和软件采用实际 AUV 系统中使用的设备和程序,可以在 AUV 下水试验之前全程实时地调试系统硬件和软件。为了验证上述一体化推进系统模型的正确性和计算控制电压的正确性,在该平台上进行了试验。

这里采用 AUV 上调试好的 PID 控制算法与 H_∞ 鲁棒控制算法进行对比。所设计的 PID 控制参数和 H_∞ 鲁棒控制的目标均为使系统满足稳定性和快速性的同时,

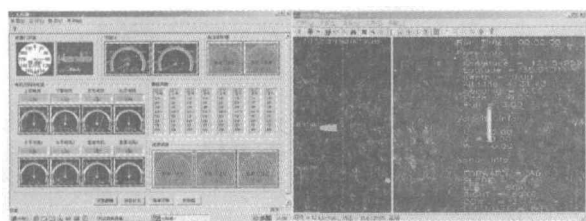


图2 AUV半物理仿真平台

要使 AUV 具有尽量小的超调量。由于载体动力学模型式(1)的线性项水动力系数 N_r 是影响系统转向性能的关键所在,且该系数减小时易引起系统的不稳定,因此将 N_r 分别减小 33.33%、90%和 150%进行对比试验。从图 3 和图 4 可以看出,当 N_r 减小 150%,即 $N_r = N_{r0} \times (1-150\%)$ 时,采用 PID 控制的 AUV 出现临界震荡,而采用 H_∞ 鲁棒控制的 AUV 仍具有良好的控制性能。

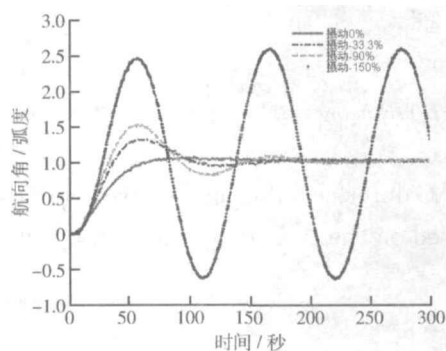
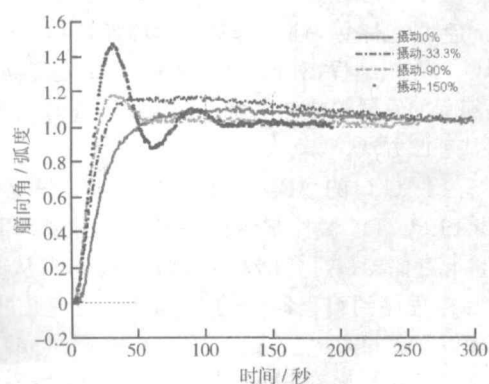


图3 参数扰动时,PID控制效果比较

图4 参数扰动时, H_∞ 控制效果比较

6 结 论

本文通过适当选择灵敏度函数和补灵敏度函数的加权函数,设计了 H_∞ 鲁棒控制器。所设计的基于 H_∞ 混合灵敏度的鲁棒控制器,在满足系统稳定性和快速性的前提下,提高了系统的鲁棒稳定性和鲁棒性能。AUV 多功能仿真平台试验结果表明:基于 H_∞ 混合灵敏度的鲁棒控制可以克服外界不确定性扰动的影响,使系统具有一定的鲁棒稳定性和鲁棒性能。但是,该种鲁棒控制是在保证最坏情况下满足系统的鲁棒稳定性和鲁棒性能,因此具有很大的保守性,为了克服该缺点,研究 AUV 的结构奇异值鲁棒控制是未来研究工作之一。

参考文献

- [1] 赵怀慈,黄莎白. 基于 OOA 的潜艇打捞仿真建模研究[J]. 计算机仿真, 2002, 19(4): 19-21, 85, 88.
- [2] KIM J H, LEE K R, CHO Y C, et al. Mixed H_2 、 H_∞ control with regional pole placements for underwater vehicle systems[J]. Proceedings of the American Control Conference, Chicago, Illinois, 2000.
- [3] LEE K R, OH D C, BANG K H, et al. Mixed H_2 、 H_∞ control for underwater vehicle with time delay and parameter uncertainty[J]. Proceedings of the American Control Conference, Albuquerque, New Mexico, 1997; 3 225-3 229.
- [4] LOGAN, C L. A comparison between H_∞ /mu synthesis control and sliding-mode control for robust control of a small autonomous underwater vehicle[J]. Proceedings of the 1994 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, 1994; 399-416.
- [5] LIU K ZH, WANG X H, FENG X SH. The design and development of simulator system - for manned submersible vehicle[C]. Proceedings of the 2004 IEEE international conference on robotics and biomimetics, Shenyang, China, 2004; 294-299.