

# Research on the Structure Singular Value Robust Control of Underwater Vehicle

Kaizhou Liu, Wei Guo, Xiaohui Wang, and Xisheng Feng

State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, CAS, Shenyang, P.R.China (liukzh@sia.cn)

**Abstract**—In order to fulfill high accurately control of HOV' dynamic positioning on the condition of multiple uncertainties, and overcome the guarantee of the  $H_\infty$  robust controller, a robust controller based on structure singular value theory was designed for deep sea HOV. Dynamic positioning test and comparison test between difference control arithmetic were carried out on the semi-physical simulation platform. The results showed that the controller designed take effect on the disturbance and parameter changing of HOV.

**Keywords**—HOV (Human Occupied Vehicle), DP (Dynamic Positioning), Robust Control, Mixed Sensitive, SSV (Structure Singular Value)

## 基于结构奇异值的水下机器人鲁棒控制研究

刘开周 郭威 王晓辉 封锡盛

中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 沈阳, 辽宁, 中国

**摘要** 为了使载人潜水器(HOV, Human Occupied Vehicle)在多环节不确定条件下满足动力定位的控制精度要求, 和克服基于混合灵敏度鲁棒控制的保守性, 设计了基于结构奇异值的鲁棒控制器。通过HOV半物理仿真平台上的控制算法对比试验, 证明了所设计的结构奇异值鲁棒控制器不但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而且克服了  $H_\infty$  鲁棒控制的保守性, 控制效果令人鼓舞。

**关键词** 载人潜水器, 动力定位, 鲁棒控制, 混合灵敏度, 结构奇异值

### 1. 引言

随着海洋开发事业的迅速发展, 水下施工和建设项目越来越多, 对于水下作业手段的性能要求也越来越高。由于水下机器人能够在水下进行观察、摄像、打捞和施工作业, 因此, 在海洋开发中得到广泛的应用。目前, HOV 的应用领域可大致归结为水下工程、科学考察、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、深海基因获取等诸多方面, 已经产生了巨大的经济效益和社会效益, 具有潜在的应用前景。因此, HOV 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<sup>[1]</sup>。

本文工作得到国家高科技研究发展计划(编号: 2009AA093302, 2003AA401000), 国家安全重大基础研究项目(编号: 6138101004-3, 6138102005-4), 中科院知识创新工程(编号: YYYJ-0917, A1320070051, O7A6210601)支持。

HOV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, 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HOV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  $H_\infty$  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 等<sup>[2][3]</sup>对水下机器人进行了区域极点配置的  $H_2$ 、 $H_\infty$  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<sup>[4]</sup>比较了  $H_\infty$  鲁棒控制、 $\mu$  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。文献[5]研究了基于混合灵敏度的  $H_\infty$  水下机器人鲁棒控制方法, 并通过了仿真验证。

文章首先建立 HOV 的动力学模型,然后简述基于结构奇异值鲁棒控制理论,然后基于结构奇异值鲁棒控制原理为 HOV 设计了鲁棒控制器,在给出在半物理仿真平台上的试验结果后给出结论。

## 2. HOV 控制系统数学模型

HOV 控制性能的优劣取决于控制器的智能程度和水平,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。HOV 控制器的设计基础主要基于 HOV 的动力学模型。HOV 的动力学模型一般依据标准潜艇动力学及其修正方程基础上建立起来的<sup>[6]</sup>。在这些动力学方程里,HOV 受到的外部力合力矩

$$\sum F_{ext} = F_{hydro} + F_{lift} + F_{drag} + F_{control} \quad (1)$$

以动力学方程中的水动力系数来体现,例如:

$$F_{drag} = -\left(\frac{1}{2}\rho c_d A_f\right)u|u| = X_{u|u}|u| \quad (2)$$

这里

$$X_{u|u} = \frac{\partial F_d}{\partial (u|u)} = -\left(\frac{1}{2}\rho c_d A_f\right) \quad (3)$$

这些水动力系数一般通过以下途径获得<sup>[6]</sup>:

- 1) 拖曳水池、风洞、旋臂水池实验;
- 2) Newman 附加质量原理或 Blevins 经验公式;
- 3) Newman 横向流体动力学原理或 Hoerner;
- 4) Bottaccini, Fidler, Hoerner 等经验公式获得载体浮力系数。

在建立 HOV 动力学模型时有如下假设:

- 1) HOV 是个质量不变的刚体。换句话说,在作业过程中,HOV 的质量及其质量分布不会发生变化;
- 2) HOV 沉浸在同种介质无限大流场中。即载体的位置远离自由表面,不受水面、海底、侧壁等的影响。
- 3) HOV 不存在记忆效应。在 HOV 仿真器中,不受其自身引起兴波的影响。

综合 HOV 刚性载体上所受到的各种力和力矩,可以得到其六自由度非线性动力学模型,其中纵轴向上的动力学模型<sup>[6]-[9]</sup>为:

$$\begin{aligned} & (m - X_{\dot{u}})\dot{u} + m z_g \dot{q} - m y_g \dot{r} \\ & = (X_{wq} - m)wq + (X_{qq} + m x_g)q^2 \\ & + (X_{vr} + m)vr + (X_{rr} + m x_g)r^2 \\ & + X_{u|u}|u| + X_{vv}v^2 + X_{vw}w^2 \\ & - m y_g pq - m z_g pr + X_{prop} \end{aligned}$$

$$-(P - B)\sin\theta \quad (4)$$

上述方程与其它五自由度方程一起构成 HOV 的动力学模型,写成矩阵形式如下:

$$(M_{RB} + M_A)\dot{v} + (C_{RB}(v) + C_A(v))v + D(v)v + G(\eta) = B\tau \quad (5)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (6)$$

其中  $M_{RB}$  是刚体质量矩阵,  $M_A$  是附加质量矩阵,  $\dot{v}$  是加速度向量,  $v$  是速度向量,  $C_{RB}$  是哥氏力矩阵,  $C_A$  是附加哥氏力矩阵,  $D$  是粘性力矩阵,  $G$  是重力和浮力向量,  $\eta = [\phi \ \theta \ \psi]^T$  姿态角分别为横滚角、纵倾角和艏向角,  $B$  推力输入矩阵,  $\tau$  控制输入向量。

$J(\eta) = \text{diag}\{J_1(\eta), J_2(\eta)\}$  载体坐标系向大地坐标系的坐标转化矩阵,这里  $s(\bullet) = \sin(\bullet)$ ,  $c(\bullet) = \cos(\bullet)$ 。

$$J_1(\eta) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta\phi & s\psi s\theta + c\psi c\theta\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta\psi & -c\psi s\theta + s\psi c\theta\phi \\ -s\theta & \cos\theta \sin\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}$$

$$J_2(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi / \cos\theta & \cos\phi / \cos\theta \end{bmatrix}$$

以下符号如不特殊说明,载人潜水器模型中的符号见文献[9]。

## 3. 结构奇异值鲁棒控制原理

### 3.1 标准结构奇异值控制问题

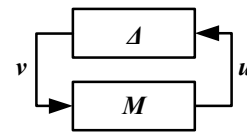


图1 结构奇异值标准问题

图1中传递函数矩阵  $M \in C^{m \times n}$ , 包括对象的标称模型、控制器和多环节不确定性的加权函数。摄动块  $\Delta$  是一个块对角矩阵,它仅仅包含各种类型的不确定性摄动。图1还反映了系统的摄动  $\Delta$  是如何与有限维的线性定常系统  $M$  相互联系的。标称系统  $M$  的输入  $v$  包括所有外部输入信号,即需要跟踪的参考指令信号  $r$ 、扰动  $d$  及传感器噪声和反馈控制输入。 $M$  的输出  $u$  包括所有需要满足稳定性和性能指标的受控对象输出和反馈到控制器的传感器信号。 $\Delta$  结构是根据实际问题的不确定性和系统所要求的性能指标来确定的。基于结构奇异值鲁棒控制所设计的符号见文献[10]。

### 3.2 鲁棒稳定性

结构奇异值 SSV 作为鲁棒性分析的有效工具,其显著作用主要体现在频域分析上。应用结构奇异值 SSV,可以使系统的鲁棒稳定性和鲁棒性能的分析统一起来,采用统一的框架来处理。对于该结构式不确定性系统,有如下的鲁棒稳定性定理。

**【定理】**(小  $\mu$  定理) 如图 1 所示闭环系统中,  $M \in C^{n \times n}$ ,  $\Delta(s) \in B_{\Delta}(s)$ , 则该系统鲁棒稳定的充要条件是:

$$\mu = \sup_{\omega \in \mathbb{R}} \mu_{\Delta}[M(j\omega)] < 1 \quad (7)$$

上述定理中,假定标称系统  $M(s)$  为稳定的,并不失一般性。因为对于不稳定的标称被控对象总可以预先用一反馈控制器  $K(s)$  使其闭环稳定,从而构成稳定的  $M(s)$ 。

### 3.3 鲁棒性能

在系统分析中,稳定性是控制系统的基本指标,因此,对含有不确定性的系统,鲁棒稳定是首要条件。但是,稳定性并不是控制系统的唯一指标,我们更感兴趣的是在满足系统鲁棒稳定的同时,达到预定的鲁棒性能。下面分析控制系统在结构不确定性作用下的鲁棒性能问题。

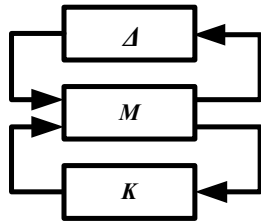


图 2 带有控制器的结构奇异值问题

考虑如图 2 所示带有控制器的结构奇异值系统,这是带有一个摄动块的系统,  $r$  为输入信号,  $d$  为外部干扰,  $e$  为误差信号,  $y$  为输出,  $\Delta$  为乘性扰动。不失一般性,令  $\|\Delta\|_{\infty} \leq 1$ ,  $W_3(s)$  为加权函数,易得该系统闭环鲁棒稳定的充要条件为:

$$\|W_3 T\|_{\infty} = \|W_3 G K (I + G K)^{-1}\|_{\infty} < 1 \quad (8)$$

对系统噪声  $d$  的抑制,作为系统性能指标,要求满足:

$$\|W_1 S_{\Delta}\|_{\infty} = \|W_1 (I + G(I + W_2 \Delta) K)^{-1}\|_{\infty} < 1 \quad (9)$$

式中  $S_{\Delta} = (I + G(I + W_2 \Delta) K)^{-1}$ ,  $W_1(s)$  为加权函数,由设计者给出。

如果系统同时满足式(8)和式(9),则称系统具有鲁棒性能。综合式(8)和式(9),易得系统满足鲁棒性能的充要条件

为:

$$\|W_1 S\| + \|W_3 T\|_{\infty} < 1 \quad (10)$$

式中  $S = (I + G K)^{-1}$ ,  $T = G K (I + G K)^{-1}$ 。它们分别为灵敏度函数和补灵敏度函数。

## 4. 基于结构奇异值的 HOV 控制器设计

### 4.1 加权函数的选择

采用结构奇异值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。加权函数的选择是结构奇异值理论在实际应用中的一个难题。

在基于结构奇异值的 HOV 鲁棒控制器设计中,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 HOV 系统性能要求来决定。

### 4.2 控制器设计

结构奇异值控制器设计的主要步骤如下:

- 1、选择适当的系统模型;
- 2、根据系统要求选择加权函数;
- 3、结构奇异值控制器的综合;
- 4、系统性能评价。

其中,综合过程是一个反复迭代的过程,改变系统设定的加权函数,求取次优控制器。系统评价就是对设计出的各项性能是否满足要求,进行系统试验。如果设计满足性能要求则设计完成,如果不满足,则返回第一或第二步重新进行设计,直到性能满足要求为止。

将 HOV 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。以航向角结构奇异值鲁棒控制器设计为例,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  $P_h$ 。

$$P_h = \begin{bmatrix} W_{1h} & -W_{1h}G_h \\ \mathbf{0} & W_{3h}G_h \\ \mathbf{I} & -G_h \end{bmatrix} \quad (11)$$

得到的  $P_h$  为 5 个状态、2 输入 3 输出的状态空间系统。

$$P_h = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (12)$$

参考某型飞机的加权函数形式,经过反复调整和验证,

HOV 在  $\xi$ 、 $\eta$ 、 $\zeta$  和  $\psi$  4 个自由度选择的加权函数分别为。对系统  $P_h$  进行结构奇异值鲁棒控制器综合设计, 得到与  $P_h$  同阶次的  $H_\infty$  控制器  $K_h$ , 其半物理仿真平台 HOV 中采用离散化后的状态空间形式。

$$K_h = \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:

$$A_k = \begin{bmatrix} 0.9998 & -4.97e-16 & 2.95e-18 & -9.9e-13 & -1.084e-11 \\ 0.0056 & 7.06e-5 & -5.76e-7 & 0.1324 & 0.7897 \\ -0.0064 & -4.9e-5 & 0.9920 & -0.0276 & 0.0109 \\ 0.0730 & 0.00042 & -7.54e-6 & 0.7401 & -0.1236 \\ 0.0077 & 9.26e-5 & -7.93e-7 & 0.1732 & 0.987 \end{bmatrix}$$

$$B_k = [1.097 \quad 0.001989 \quad -0.003311 \quad 0.04204 \quad 0.00287]^T$$

$$C_k = [3278 \quad 434.9 \quad -3.522 \quad -1.034e4 \quad -5883]$$

$$D_k = [0]$$

其传递函数为:

$$K_h(s) = \frac{3145.3463(z+1.992e-007)(z-0.9813)(z-0.9917)(z-1)}{z(z-0.9998)(z-0.992)(z^2-1.727z+0.7519)} \quad (14)$$

控制器特征多项式的根分别为:

$$[0.9998 \quad 0.8636+0.0781i \quad 0.8636+0.0781i \quad 0.00.9920]$$

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:

$$\gamma = 0.4850$$

## 5. 实验研究

由于水下机器人工作环境的特殊性, 其硬件及软件的研究、开发和测试十分困难, 主要是研究人员不能像在陆地上那样直接干预处于密封状态的硬件及软件, 对其运行进行测量和调试。未经水下充分调试和运行的水下机器人由于内部故障或不可预见的环境因素而导致丢失的风险很大, 其性能也无法保证。这就形成了不下水设备无法调试验证, 下了水调试难度增加的矛盾。这种矛盾会由于所用船只、气象和海况等因素的影响而加剧。

为了保证 HOV 湖试和海试现场的安全性, 降低系统现场试验的风险, 建立了如下图 3 所示的半物理仿真平台<sup>[11]</sup>。由于该平台的自动驾驶计算机硬件和软件采用实际 HOV 系统中使用的设备和程序, 可以在 HOV 下水试验之前全程实时地调试系统硬件和软件。为了验证上述设计的结构奇异值鲁棒控制器的正确性, 在该平台上进行了试验。



图 3 HOV 半物理仿真平台

这里采用 HOV 上调试好的 PID 控制算法、 $H_\infty$  鲁棒控制算法和结构奇异值鲁棒控制算法进行对比。所设计的 PID 控制参数和  $H_\infty$  鲁棒控制的目标均为使系统满足稳定性和快速性的同时, 要使 HOV 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。从下图 4、图 5 和图 6 可以看出, 当  $N_r$  减小 150%, 即  $N_r = N_{r_0} * (1-150\%)$  时, 采用 PID 控制的 HOV 出现临界震荡, 而采用结构奇异值 SSV 鲁棒控制仍具有良好的控制性能, 而且结构奇异值 SSV 鲁棒控制效果要优于  $H_\infty$  鲁棒控制效果。

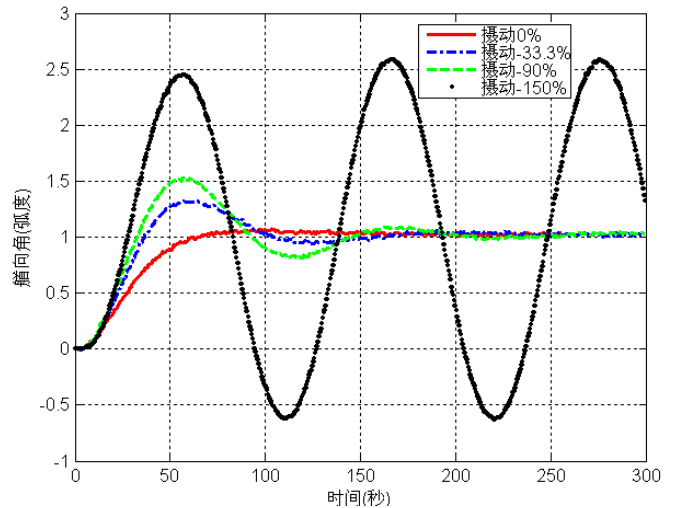


图 4 参数扰动时, PID 控制效果比较

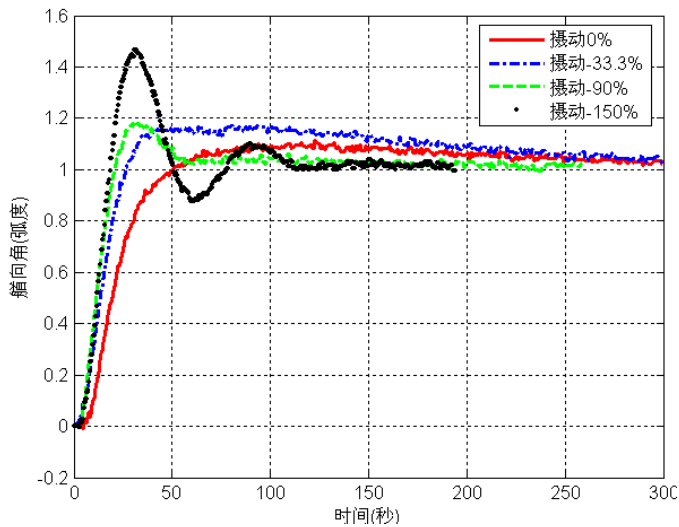


图5 参数摄动时,  $H_\infty$  控制效果比较

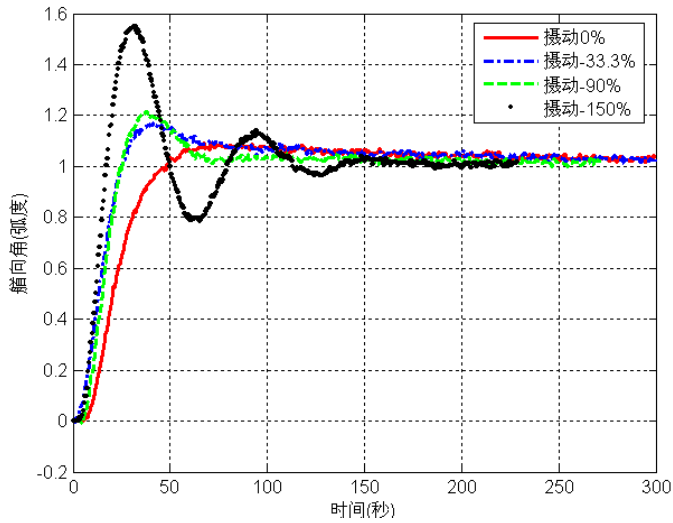


图6 参数摄动时, SSV 控制效果比较

## 6. 结论

为了提高水下机器人控制系统的鲁棒稳定性和鲁棒性能,克服  $H_\infty$  鲁棒控制中的保守性,本文设计了基于结构奇异值 SSV 的鲁棒控制器。该控制器能更加有效地克服水下机器人系统中存在的不确定性,提高控制系统的快速性,减小系统稳态误差。HOV 半物理仿真平台试验结果表明:基于结构奇异值的鲁棒控制能更好的可以克服外界不确定性扰动的影响,使系统具有更好的鲁棒稳定性和鲁棒性能。

## 参考文献

[1] 刘涛. 大深度潜水器结构分析与设计研究. 博士学位论文, 中国船舶科学研究中心, 2001:1-22.

[2] Jong Hae Kim, Kap Rai Lee, Yong Chul Cho, etc. "Mixed  $H_2$ 、 $H_\infty$  Control with Regional Pole Placements for Underwater Vehicle Systems," *Proceedings of the American Control Conference*, Chicago, Illinois. 2000.

[3] Kap Rai Lee, Do Chang Oh, Kyeong Ho Bang, etc. "Mixed  $H_2$ 、 $H_\infty$  Control for Underwater Vehicle with Time Delay and Parameter Uncertainty," *Proceedings of the American Control Conference*, Albuquerque, New Mexico 1997: 3225~3229.

[4] Logan, C.L., "A Comparison between H-infinity/Mu synthesis Control and Sliding-mode Control for Robust Control of a Small Autonomous Underwater Vehicle," *Proceedings of the 1994 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, 1994: 399~416.

[5] 赵浩泉, 刘开周, 封锡盛. 基于混合灵敏度的水下机器人鲁棒控制研究, *仪器仪表学报*, 2007.28(11), P504-507.

[6] Timothy Prester, "Development of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle", *MTS/IEEE Conference and Exhibition, OCEANS 2001*, vol.1, November 5-8, 2001, pp450-455.

[7] J. Yuh, *Underwater Vehicles Design and Control*, TSI Press Series, 1996.

[8] 陈厚泰. 潜艇操纵性. 国防工业出版社, 1981.6.

[9] 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人. 辽宁科学技术出版社, 2000.

[10] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用. 清华大学出版社, 2003.9.

[11] Kaizhou Liu, Xiaohui Wang, Xisheng Feng, "The design and development of simulator system — for manned submersible vehicle," *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Shenyang, China, 2004. 294-299.