

文章编号: 1001-0920(2005)11-1241-04

## 不对称信息理论与非线性鲁棒控制算法

张显库, 杨盐生

(大连海事大学 航海动态仿真和控制实验室, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 针对非线性船舶航向保持系统, 通过设计其精确反馈线性化控制器, 给出一种物理意义更明显的解释, 即非线性精确反馈线性化控制器由非线性函数项和常规线性控制器组成. 将简化的精确反馈线性化法与闭环增益成形算法相结合, 设计其非线性鲁棒控制器, 增加了信息的传递量, 在提高系统鲁棒性能的基础上, 使该算法成为实际工程上可用的算法. 仿真结果表明, 当信息传递充分时, 航向保持效果良好.

**关键词:** 不对称信息理论; 闭环增益成形; 精确反馈线性化; 非线性; 鲁棒性

**中图分类号:** U 666 153; TP273.4

**文献标识码:** A

## A symmetric Information Theory and Nonlinear Robust Control Algorithm

ZHANG Xian-ku, YANG Yan-sheng

(Laboratory of Simulation and Control of Navigation Systems, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Correspondent: ZHANG Xian-ku, Email: zhangxk@dlm. edu. cn)

**Abstract:** A symmetric information theory is introduced. For a nonlinear course keeping system of ships, the information transmitting capacity is strengthened through transforming the exact feedback linearization controller into a controller consisting of nonlinear terms and a normal linear controller. A simplified nonlinear robust control algorithm is presented, which connects the exact feedback linearization with the closed-loop gain shaping algorithm. The algorithm is applicable in engineering and the simulation results show that the course-keeping performance is improved.

**Key words:** A symmetric information theory; Closed-loop gain shaping; Exact feedback linearization; Nonlinear; Robustness

### 1 引言

乔治·阿克洛夫首先提出了不对称信息理论, 该理论证明了信息不对称会产生市场的逆向选择<sup>[1]</sup>.

文献[2, 3]分别给出了不对称信息理论在药品市场和住宅市场中的应用. [4~6]指出在船舶运动控制领域, 智能控制和鲁棒控制是控制器设计的两大热点研究领域. 随着先进、复杂控制算法的不断出现, 其计算机仿真结果非常理想. 将先进、复杂的理论进行实际工程应用简化, 建立有效的信息传递通道, 便于理论简化和实际工程应用. [7]指出船舶运

动数学模型具有严重的非线性, 精确反馈线性化方法是处理非线性系统控制器设计问题的有效方法, 但其理论较难理解, 求解过程也较麻烦. [8]给出了闭环增益成形算法的原理及设计过程, 利用 $H_\infty$ 鲁棒控制理论混合灵敏度算法的结果, 用构造方法设计出鲁棒控制器, 所用参数具有工程意义, 是一种简化的 $H_\infty$ 鲁棒控制算法. [9]证明了一阶的闭环增益成形算法即为PD算法, 并给出其应用. [10]是闭环增益成形算法应用于MMO系统的实例. [11]是闭环增益成形算法应用于SMO系统的实例.

本文针对非线性船舶航向保持系统, 通过设计

收稿日期: 2004-11-09; 修回日期: 2005-03-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474014).

作者简介: 张显库(1968—), 男, 辽宁辽阳人, 教授, 博士生导师, 从事船舶运动控制、鲁棒控制等研究; 杨盐生(1957—), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士生导师, 从事船舶操纵理论、船舶运动仿真等研究.

其精确反馈线性化控制器,给出一种物理意义更明显的解释.将简化的精确反馈线性化法与闭环增益成形算法相结合,给出一种非线性鲁棒控制算法,增加了信息的传递量,在提高系统鲁棒性能的基础上,使该算法成为实际工程上可用的算法.仿真结果表明效果良好.

## 2 船舶航向精确反馈线性化控制器

采用非线性状态反馈和恰当的坐标变换,在一定条件下,可将一个仿射非线性系统进行精确线性化,使此状态反馈保证控制系统的稳定性,并且具有较好的动态品质.

### 2.1 仿射非线性系统

在工程实际中,很多非线性系统的数学模型具有以下形式:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = f(X(t)) + \sum_{i=1}^m g_i(X(t))u_i(t), \\ Y(t) = h(X). \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $X \in R^n$  为状态向量,  $u_i (i = 1, \dots, m)$  为控制量,  $f(X)$  和  $g_i(X) (i = 1, \dots, m)$  均为  $n$  维函数向量,  $h(X)$  为  $m$  维输出函数向量.

### 2.2 关系度 $r$ 等于系统阶数 $n$ 的线性化设计

对于式(1)给出的非线性系统,假设系统的关系度  $r$  等于状态向量  $X$  的维数  $n$ ,则系统可转化为以下标准型:

$$\begin{cases} \dot{z}_i = z_{i+1}, i = 1, \dots, n-1; \\ \dot{z}_n = \alpha(X) + \beta(X)u \Big|_{X=\Phi^{-1}(z)}. \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $\alpha(X)$  和  $\beta(X)$  为  $X$  的非线性标量函数,  $\alpha(X) = L_f^n h(X)$ ,  $\beta(X) = L_g L_f^{n-1} h(X)$ . 式(2)所示的标准型中,第1至第  $n-1$  个方程都已线性化,为使其完全精确线性化,在式(2)中令

$$v = \alpha(X) + \beta(X)u, \beta(X) \neq 0 \quad (3)$$

这样便得到一个以新坐标系  $Z = [z_1, z_2, \dots, z_n]^T$  描述的完全可控且已被精确线性化的系统

$$\dot{z}_i = z_{i+1}, \dot{z}_n = v, i = 1, \dots, n-1 \quad (4)$$

这种形式称为 Brunovsky 标准型

由式(3)得到控制  $u$  的表达式为

$$u = -\frac{L_f^n h(X)}{L_g L_f^{n-1} h(X)} + \frac{1}{L_g L_f^{n-1} h(X)} v. \quad (5)$$

其中:  $v$  是线性标准型系统的控制量,可用具有二次型性能指标的线性最优控制或鲁棒控制等设计方法获得.

### 2.3 基于状态反馈精确线性化法的船舶航向保持控制器设计

设计船舶非线性控制律,使船舶实际航向  $\psi$  跟随期望参考航向  $\psi_r$ . 系统航向偏差  $e = \psi - \psi_r$ , 令  $x_1 = \psi, x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\psi} = r$ , 则

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x_2) + bu, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$f(x_2) = -\frac{K}{T}H(\psi),$$

$$H(\psi) = \alpha\psi + \beta\psi^3,$$

$$b = K/T, u = \delta,$$

$K$  和  $T$  为船舶模型操纵性指数,  $\delta$  为舵角.

1) 检查该系统是否能够通过坐标变换及状态反馈转化为线性可控的系统: 因为  $n = 2$ , 只需计算

$$\text{ad}_f g(X) = \frac{\partial}{\partial X} f(X) \cdot g(X) - \frac{\partial}{\partial X} g(X) \cdot f(X) = \begin{bmatrix} -K/T \\ K^2/T^2(\alpha + 3\beta x_2^2) \end{bmatrix}.$$

在  $X = 0$  处,

$$[g(X) \quad \text{ad}_f g(X)]_{X=0} = \frac{K}{T^2} \begin{bmatrix} 0 & -T \\ T & K\alpha \end{bmatrix}$$

的秩为 2, 等于系统的阶数  $n$ , 故该系统可精确线性化为 Brunovsky 线性标准型.

2) 求坐标变换  $Z = \Phi(X)$ : 当  $h(X) = x_1$  时, 有

$$L_f h(X) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_2 \\ -K(\alpha x_2 + \beta x_2^3)/T \end{bmatrix} = x_2 \quad (7)$$

故坐标变换为

$$z_1 = x_1, z_2 = x_2 \quad (8)$$

由此可见, 所给系统可以不经过坐标变换而直接转化为线性系统.

3) 求控制律  $u$ : 计算

$$\begin{aligned} L_f^2 h(X) &= [0 \quad 1][x_2 \quad -K(\alpha x_2 + \beta x_2^3)/T]^T = \\ &= -K(\alpha x_2 + \beta x_2^3)/T, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} L_g L_f h(X) &= [0 \quad 1][0 \quad K/T]^T = K/T. \end{aligned} \quad (10)$$

则

$$u = \frac{-L_f^2 h(X) + v}{L_g L_f h(X)} = \alpha x_2 + \beta x_2^3 + \frac{T}{K} v. \quad (11)$$

将式(11)代入式(6)可以发现, 精确反馈线性化控制律的本质是将非线性部分对消, 然后加上一个线性化后的控制律. 这样, 若遇到类似的问题, 设计精确反馈线性化控制器时, 便可根据此规律直接写出其控制律, 无需再进行推导计算.

## 3 与闭环增益成形算法结合

实际海况十分恶劣, 船舶航速和装载等因素时

常变化, 船舶航向的保持多采用鲁棒控制算法<sup>[4]</sup>, 以确保航行的稳定性和经济性  $H$  鲁棒控制理论的混合灵敏度问题是一种闭环增益成形算法<sup>[4]</sup>, 通过加权矩阵对闭环传递矩阵(补灵敏度矩阵) $T = GK(I + GK)^{-1}$ ( $G$  和  $K$  分别为被控对象和控制器的传递矩阵)和灵敏度矩阵 $S = (I + GK)^{-1}$ 成形, 使系统满足控制性能和鲁棒稳定性的要求 该算法通过对闭环传递矩阵的范数优化问题求解控制器, 是处理矩阵的奇异值而不是传递矩阵本身, 因而必须运用复杂的数学工具, 求解困难 其理论的严密性取决于加权矩阵的选取, 进而使灵敏度矩阵 $S$ 和补灵敏度矩阵 $T$ 成形, 以保证系统的鲁棒性和鲁棒稳定性 闭环系统具有实际工程意义的参数, 如带宽频率、关门斜率(或称高频渐近线斜率)、闭环频谱峰值与权函数之间的关系模糊, 故鲁棒控制器的设计需要权函数迭代经验

$H$  控制的回路成形算法是一种开环增益成形方法<sup>[6]</sup>, 回路成形控制器的设计在于获得控制器 $K$ , 使得开环传递函数阵 $L = GK$ 的增益 $\sigma(L)$ 和 $\bar{\sigma}(L)$ 具有在低频区域满足控制性能要求, 在高频区域满足鲁棒稳定性要求的形状, 即呈现低频高增益, 高频低增益特性 回路成形 $H$  控制理论通过权函数选择改善开环奇异值频率特性曲线, 以实现系统的闭环性能, 并在鲁棒性能指标和鲁棒稳定性之间进行折衷 其优点是设计者可以了解如何改变 $L$ 的形状, 以获得鲁棒性能较满意的控制器 $K$ ; 缺点是没有直接考虑决定系统响应的闭环传递函数矩阵, 如 $S$ 和 $T$ .

本文利用 $H$  控制的混合灵敏度控制算法的结果, 用具有工程意义的 4 个参数直接构造补灵敏度函数 $T$ ,  $T$ 和 $S$ 具有相关性( $T = I - S$ ), 从而间接地构造出 $S$ , 然后反推出控制器 $K$ , 这是一种工程上可用的闭环增益成形算法<sup>[7-11]</sup>  $H$  控制的混合灵敏度控制算法是正向思维的产物, 回路成形算法是发散思维的产物, 而闭环增益成形算法则是逆向思维的产物, 其核心是直接构造的系统闭环传递函数矩阵的表达式设计控制器 用于构造 $T$ 的 4 个参数, 如最大奇异值、带宽频率、关门斜率、闭环频谱峰值都具有实际的工程意义  $S$ 和 $T$ 的相关性间接地确定了 $S$ 的形状, 进而保证了系统的鲁棒稳定性, 其特点是物理概念清晰, 求解过程简单

将闭环增益成形算法应用于船舶运动控制, 理论的工程意义明确, 简单易行, 使实际工程科技人员易于接受和应用 从不对称信息理论上理解,  $H$  鲁棒控制理论需要艰深的数学基础和权函数的选择经验, 阻碍了其应用于实际工程 闭环增益成形算法简

单, 可以证明一阶闭环增益成形算法即为鲁棒 PD 算法 也可将闭环增益成形算法看成简化的  $H$  鲁棒控制混合灵敏度算法, 从而增加了新算法应用的信息传递量

本文采用二阶的闭环增益成形算法, 系统闭环传函频谱的关门斜率取  $-40$  dB/dec, 补灵敏度函数 $T$ 的奇异值曲线近似构造为最大奇异值为 1 的二阶惯性系统的频谱曲线, 即 $T = 1/(T_{1s} + 1)^2$  与典型的二阶振荡环节相比, 相当于阻尼系数为 1 的情况, 从而保证了 $T$ 的频谱没有峰值 由被控对象 $G$ 和闭环系统的带宽频率 $1/T_1$ , 可推出基于闭环增益成形算法的控制器

$$K = \frac{1}{2GT_{1s}\left(\frac{T_1}{2}s + 1\right)} \quad (12)$$

如果用闭环增益成形算法设计 $v$ , 取 $e_1 = \Psi_r - \Psi = \Psi_r - x_1$ ,  $e_2 = -x_2$ , 设计控制器时被控对象采用线性的二阶 Nomoto 模型, 即 $G = K/(s(Ts + 1))$ . 利用式(12)可得

$$v = Ke_1 = \frac{1}{2GT_{1s}\left(\frac{T_1}{2}s + 1\right)}e_1 = \frac{Ts + 1}{2KT_1\left(\frac{T_1}{2}s + 1\right)}e_1$$

式(11)可转变为

$$u = -\alpha x_2 - \beta x_2^3 + \frac{T}{K} \frac{Ts + 1}{2KT_1\left(\frac{T_1}{2}s + 1\right)}e_1 \quad (13)$$

#### 4 仿真实例

以大连海事大学实习船“育龙”号为例进行仿真 船舶参数为: 两柱间长 126 m, 船宽 20.8 m, 满载吃水 8.0 m, 方形系数 0.681, 航速 15 kn, 舵叶面积 18.8 m<sup>2</sup>, 排水量 14 278.1 m<sup>3</sup>. 由这些参数可计算出船舶 Nomoto 模型参数<sup>[12]</sup>:  $K = 0.48$ ,  $T = 216.58$ ,  $\alpha = 9.16$ ,  $\beta = 10.814.30$

图 1 给出名义模型下鲁棒精确反馈线性化控制器( $T_1 = 5$  s)的控制效果, 可以看出, 控制效果良好 图 2 为加上舵机特性后的仿真结果; 图 3 为仿真时用的舵机系统模型( $N = 0.2\%$ )<sup>[4]</sup>. 设计控制器时并未考虑舵机模型, 对于名义模型来说舵机模型相当于一种结构摄动 从仿真曲线可以看出, 用闭环增益成形算法设计的控制器效果稳定, 当模型产生摄动后, 控制器具有鲁棒性 图 4 给出了 5 级风风向 40°时的仿真结果, 用 Simulink 仿真时, 包括非线性力和风浪干扰的非线性船舶运动数学模型均用 $S$ 函数实现<sup>[4]</sup>, 由图 4 可以看出控制效果较好 如果闭环

增益成形算法取一阶情况,则为PD控制器 图5给出了同等仿真条件下非线性鲁棒PD的控制效果,

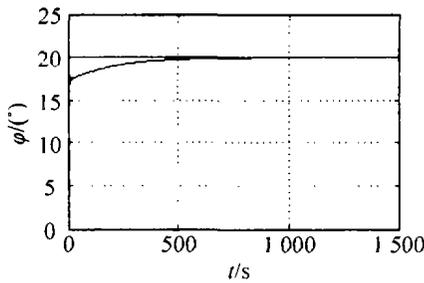


图1 名义模型下鲁棒精确反馈线性化控制效果

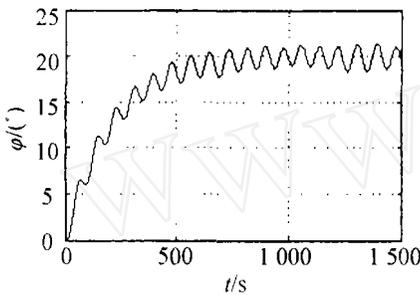


图2 加舵机模型后鲁棒精确反馈线性化控制效果

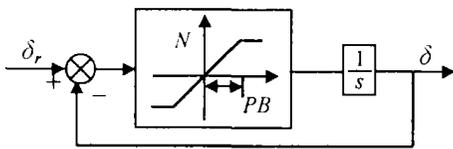


图3 电液操舵伺服系统仿真模型

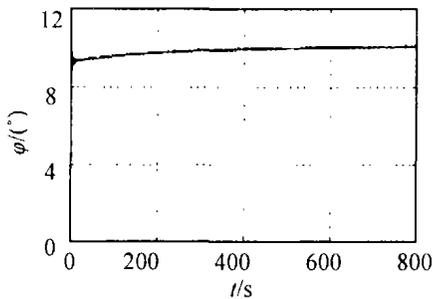


图4 5级风风向40°时鲁棒精确反馈线性化控制效果

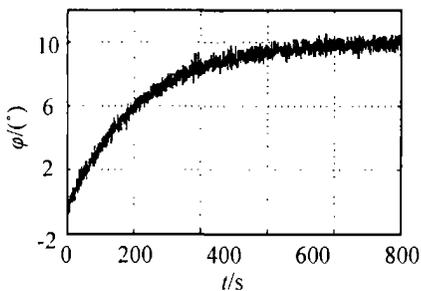


图5 5级风风向40°时非线性鲁棒PD控制效果

从仿真曲线可知,图4的上升时间要快些

### 5 结 论

本文以航向保持的示例说明不对称信息理论在船舶运动控制中的应用 将船舶非线性Nomoto模型用精确反馈线性化方法将其精确线性化,然后用闭环增益成形算法设计出一种具有鲁棒性的精确反馈线性化控制器,并用Matlab的Simulink进行名义模型、摄动模型和不同海况干扰等仿真研究 精确反馈线性化控制律的本质是将非线性部分抵消,然后加上一个线性化后的控制律 仿真结果显示本研究具有设计简单、物理意义明确、控制器鲁棒性强的优点 增加了算法的信息传递量,使该算法成为实际工程上可用的算法

### 参考文献(References)

[1] 郑长德 信息经济学的三剑客——2001年诺贝尔经济学奖评述[J]. 西南民族学院学报, 2001, 22(11): 120-127. (Zheng C D. Three Well-known Men for Information Economics [J]. J of Southwest University for Nationalities, 2001, 22(11): 120-127.)

[2] 徐金水, 陈资灿 信息不对称与药品市场价格秩序混乱及对策[J]. 卫生经济研究, 1997, 10: 13-15. (Xu J S, Chen Z C. A symmetric Information and Order Chaos for Medicine Market and Its Decision [J]. Research on Hygiene Economics, 1997, 10: 13-15.)

[3] 董琳, 朱佳林 住宅市场信息不对称问题研究[J]. 华中科技大学学报, 2003, 20(4): 81-84. (Tong L, Zhu J L. Study on A symmetric Information Problem in Housing Market [J]. J of HUST, 2003, 20(4): 81-84.)

[4] 贾欣乐, 张显库 船舶运动智能控制与H鲁棒控制[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2002. (Jia X L, Zhang X K. Intelligent Control and H Robust Control for Ships [M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2002.)

[5] 张显库, 贾欣乐, 王兴成, 等 H鲁棒控制理论发展的十年回顾[J]. 控制与决策, 1999, 14(4): 289-296. (Zhang X K, Jia X L, Wang X C, et al Review of the Development of H Robust Control Theory in the Past Decade [J]. Control and Decision, 1999, 14(4): 289-296.)

[6] 张显库, 贾欣乐, 王兴成 一种变形的回路成形控制器及应用[J]. 控制与决策, 2000, 15(1): 116-118. (Zhang X K, Jia X L, Wang X C. A Kind of Transfigured Loop Shaping Controller and Its Application [J]. Control and Decision, 2000, 15(1): 116-118.)

(下转第1250页)

力, 进而提高人力资源再分配系统的整体性能

### 参考文献(References)

- [1] 郭锐锋, 于东, 刘明烈, 等. 基于合同网的任务分配方法的研究[J]. *小型微型计算机系统*, 1999, 20(10): 740-743  
(Guo R F, Yu D, Liu M L, et al. Research of Task of Task Allocation Based on Contract Net[J]. *Mini-micro Systems*, 1999, 20(10): 740-743)
- [2] Collins J, Gini M. A Testbed for Multi-agent Contracting for Supply-chain Formation [EB/OL]. <http://www.cs.umn.edu/Research/airvl/magnet/papers/agents01w>, 2001-08-02
- [3] Welman M, Wuman P. Market-aware Agents for a Multi-agent World [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1998, 24(3-4): 115-125
- [4] 钟诗胜, 汤新民. 基于多智能体和合同网的虚拟企业伙伴选择[J]. *计算机集成制造系统*, 2004, 10(9): 1109-1113  
(Zhong S S, Tang X M. Partner Selection of Virtual Enterprise Based on Multi-agent and Contract-net Technology [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2004, 10(9): 1109-1113)
- [5] Sierra C, Jennings N, Noriega P, et al. A Framework for Argumentation Based Negotiation [A]. *Intelligent Agents IV: Proc of the 4th Int Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages* [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1998: 177-192
- [6] Vulkan N, Jennings N R. Efficient Mechanisms for the Supply of Services in Multi-agent Environments [J]. *Int J of Decision Support Systems*, 2000, 28(1-2): 5-19
- [7] Shehory O, Kraus S. *Coalition Formation Among Autonomous Agents: Strategies and Complexity* [R]. Berlin: Springer-Verlag, 1993: 57-72
- [8] Oliveira E, Fonseca J M, Garcao A S. Multi-criteria Negotiation in Multi-agent Systems [EB/OL]. <http://www.fe.up.pt/~eol/PUBLICATIONS/ceemas99>, 2002-04-24
- [9] Kraus S, Wilkenfeld J, Zlotkin G. Multi-agent Negotiation Under Time Constraints [J]. *Artificial Intelligence*, 1995, 75(2): 297-345
- [10] Oliveira E, Fonseca J M, Garcao A S. MACM - ADA I Based Resource Management System [J]. *Int J on Applied Artificial Intelligence*, 1997, 11(6): 525-550
- (上接第1244页)
- [7] 邓卫华, 张波, 丘东元, 等. 电流连续型Boost变换器状态反馈精确线性化与非线性PD控制研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(8): 45-50  
(Deng W H, Zhang B, Qiu D Y, et al. The Research of State Variable Feedback Linearization Method on the CCM Boost Converter and Nonlinear PD Control Law [J]. *Proc of CSEE*, 2004, 24(8): 45-50)
- [8] Zhang X K, Jia X L. Simplification of  $H_\infty$  Mixed Sensitivity Algorithm and Its Application [J]. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2002, 36(3): 28-33
- [9] 张显库, 贾欣乐. 求PD参数新方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2000, 22(8): 4-5  
(Zhang X K, Jia X L. A New Method for Solving PD Parameters [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2000, 22(8): 4-5)
- [10] 张显库, 贾欣乐. 用闭环增益成形算法的精馏塔鲁棒控制[J]. *系统工程与电子技术*, 2001, 23(5): 15-18  
(Zhang X K, Jia X L. Robust Control of a High Purity Distillation Column Using Closed-loop Gain Shaping Algorithm [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2001, 23(5): 15-18)
- [11] 张显库, 张丽坤, 贾欣乐. 非方阵被控对象闭环增益成形算法及其应用[J]. *大连海事大学学报*, 2001, 27(2): 63-67.  
(Zhang X K, Zhang L K, Jia X L. Closed-loop Gain Shaping Algorithm with Unsquare Matrix Plant and Its Application [J]. *J of Dalian Maritime University*, 2001, 27(2): 63-67.)
- [12] 张显库, 贾欣乐, 刘川. 响应型船舶运动数学模型的构造[J]. *大连海事大学学报*, 2004, 30(1): 18-21.  
(Zhang X K, Jia X L, Liu C. Research on Responding Ship Motion Mathematical Model [J]. *J of Dalian Maritime University*, 2004, 30(1): 18-21.)