

8-17-2020

Nonlinear H_∞ Control for Marine Speed with Parameter Perturbation and Ambient Interference

Yupeng Yuan

1. Reliability Engineering Institute, School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;;2. Key Laboratory of Marine Power Engineering ? Technology (Ministry of Communications), Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;;3. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;;

Zhang Meng

4. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;;

Xinping Yan

1. Reliability Engineering Institute, School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;;2. Key Laboratory of Marine Power Engineering ? Technology (Ministry of Communications), Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;;3. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;;

Guo Bo

5. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Nonlinear H_∞ Control for Marine Speed with Parameter Perturbation and Ambient Interference

Abstract

Abstract: In order to improve the automation level and enhance the navigation safety of ships, stable control for ship speed is very important. Good control effect is difficult to obtain based on the conventional control method since the marine speed control system is a time-varying parameters and nonlinear complicated propulsion system. *The uncertainty of the system parameters and the effect of environment such as winds, waves and currents were considered adequately in ship motion mathematical model with disturbing force. The mathematic model was linearized accurately with the differential geometry method. Then the nonlinear H_∞ controller was designed according to the linear H_∞ theory.* The simulation results show that the H_∞ controller could effectively restrain the effect of the environment disturbance, improve the stability of the control system, ensure the accuracy of control and enhance the systems' robustness.

Keywords

ship speed control, parameter perturbation, nonlinear H-infinity control, robustness

Authors

Yupeng Yuan, Zhang Meng, Xinping Yan, Guo Bo, and Jianglong Wan

Recommended Citation

Yuan Yupeng, Zhang Meng, Yan Xinping, Guo Bo, Wan Jianglong. Nonlinear H_∞ Control for Marine Speed with Parameter Perturbation and Ambient Interference[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(8): 1769-1775.

环境影响与参数摄动下船舶航速的非线性 H_∞ 控制袁裕鹏^{1,2,3}, 章勤⁴, 严新平^{1,2,3}, 郭波⁵, 万江龙^{1,2,3}

(1. 武汉理工大学能源与动力工程学院可靠性工程研究所, 武汉 430063; 2. 武汉理工大学船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 武汉 430063; 3. 武汉理工大学国家水运安全工程技术研究中心, 武汉 430063; 4. 武汉理工大学能源与动力工程学院可靠性工程研究所, 武汉 430063; 5. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092)

摘要: 为了提高船舶的自动化水平, 增强船舶的航行安全, 对航速的稳定控制是重要的因素之一。由于船舶航速控制是一个参数时变、非线性, 且其动态特性受环境因素的影响, 因此常规的控制方法难以获得良好的控制效果。在建立船舶运动的非线性数学模型时, 考虑了环境因素如风、浪、流的影响和系统参数不确定性。在此基础上, 利用微分几何的方法对模型进行了精确线性化, 然后利用线性 H_∞ 控制理论, 设计了船舶航速的非线性 H_∞ 控制器。仿真结果表明非线性 H_∞ 控制器能有效的抑制环境扰动, 提高系统的稳定性, 保证控制精度, 具有较强的鲁棒性。

关键词: 船舶航速控制; 参数摄动; 非线性 H_∞ 控制; 鲁棒性

中图分类号: U665.12 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 08-1769-07

Nonlinear H_∞ Control for Marine Speed with Parameter Perturbation and Ambient Interference

Yuan Yupeng^{1,2,3}, Zhang Meng⁴, Yan Xinping^{1,2,3}, Guo Bo⁵, Wan Jianglong^{1,2,3}

(1. Reliability Engineering Institute, School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. Key Laboratory of Marine Power Engineering & Technology (Ministry of Communications), Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
3. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
4. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
5. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to improve the automation level and enhance the navigation safety of ships, stable control for ship speed is very important. Good control effect is difficult to obtain based on the conventional control method since the marine speed control system is a time-varying parameters and nonlinear complicated propulsion system. The uncertainty of the system parameters and the effect of environment such as winds, waves and currents were considered adequately in ship motion mathematical model with disturbing force. The mathematic model was linearized accurately with the differential geometry method. Then the nonlinear H_∞ controller was designed according to the linear H_∞ theory. The simulation results show that the H_∞ controller could effectively restrain the effect of the environment disturbance, improve the stability of the control system, ensure the accuracy of control and enhance the systems' robustness.

Keywords: ship speed control; parameter perturbation; nonlinear H-infinity control; robustness

引言

船舶航速的精确稳定控制是船舶航行综合控



收稿日期: 2015-05-11 修回日期: 2015-07-06;
基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAG25B03), 湖北省自然科学基金(2013CFA007), 国家级大学生创新创业训练计划(20161049705011);
作者简介: 袁裕鹏(1980-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为控制理论与应用、船舶动力系统可靠性与绿色技术等。

制的重要部分之一, 对于实现船舶的航行安全以及航迹的自动保持, 使船舶按预定航线航行有重要意义。船舶运动本质上是非线性的, 且其动态特性取决于船型、船速、水深、负载、吃水等许多因素, 这些因素造成船舶动态模型参数偏离于标称值。因而从理论上说, 船舶航速控制器应该基于非线性控制理论来设计, 且必须具有对模型参数摄动的鲁棒

性。常规控制方法(如 PID 控制)难以达到令人满意的控制效果。

目前大多数船舶航速采用开环控制的方法,也有以定距桨系统为主的航速闭环控制方式,其船舶航速的控制主要通过调节主机转速来实现。调距桨由于能改变主机负荷大小,改善主机推进效率、获得优良的操纵性能,因此也被用于船舶航速的控制。这种以计算机控制技术实现调距桨螺距闭环控制方法已取得一定进展^[1-2]。随着现代控制技术和人工智能理论的发展,许多先进控制算法如 H_∞ 控制、模糊控制、神经网络控制、变结构控制和反步控制等相继用于航速控制器的设计,取得了丰富研究成果^[3-7]。

对于船舶航速控制,虽然利用 PID、模糊控制等方法能到达一定的效果,但由于没有考虑系统的不确定性,因而所设计的控制器不具有较强的鲁棒性。随着非线性理论的发展,越来越多的文献将非线性控制理论应用到物理系统的分析与综合^[8-10]。

由于船舶的运动具有高度的非线性,因此适合运用非线性理论来设计船舶航速的控制器。

根据以上分析,本文将非线性反馈线性化方法与 H_∞ 鲁棒控制方法相结合,设计抗干扰、鲁棒性强的船舶航速控制器,以提高系统的全局稳定性。在建立船舶航速控制的非线性数学模型时,考虑了环境因素如风、波浪等对系统的干扰。最后以“长航集运 8303”为对象进行仿真,在系统存在干扰以及参数发生摄动的情况下与传统的 PID 控制方法相比较,验证所设计的非线性 H_∞ 控制器的性能。

1 航速控制系统的数学模型

1.1 船-桨子系统数学模型

船舶在水面上的运动主要由船舶主机提供动力,主机直接或间接通过传统装置驱动螺旋桨,螺旋桨旋转产生推力,然后通过推力轴承的作用使船舶运动。所以,船桨子系统包括推进装置的旋转部分和船的直线运动这两个惯性体系,其数学模型可由下列方程式来表示^[11]。

$$(1+a)G \frac{dv}{dt} = T_e - R + w \quad (1)$$

$$(1+a')2\pi I \frac{dn}{dt} = f(m) - M_p \quad (2)$$

$$T_e = \rho n^2 D^4 (1-t_p) K_T (J) \quad (3)$$

$$M_p = \rho n^2 D^5 K_Q (J) \quad (4)$$

$$J = (1-\omega)v / (nD) \quad (5)$$

$$R = rv^s \quad (6)$$

式中: v 为航速; G 船体排水重量; n 为螺旋桨转速; T_e 为螺旋桨推力; R 为船体阻力; I 为推进系统转动部分转动惯量; a 和 a' 分别为船体与螺旋桨附加水的系数; $f(m)$ 为柴油机瞬时有有效扭矩,由柴油机特性确定, m 为柴油机转速; M_p 为螺旋桨阻力矩; K_T 和 K_Q 分别为螺旋桨的推力系数和扭矩系数,一般由螺旋桨图谱确定; D 为螺旋桨直径; t_p 为推力减额系数; ω 为伴流系数; J 为进速系数; w 为环境干扰力。

1.2 船舶主机数学模型

主机直接传动螺旋桨时,由动量矩定理可得主机运动方程为^[7,12-13]:

$$2\pi(I_{pp} + J_{pp}) \frac{dm}{dt} = M_d - M_p - M_f \quad (7)$$

式中: m 为主机转速; I_{pp} 为螺旋桨及轴系转动惯量之和; J_{pp} 为轴系及螺旋桨附加转动惯量之和; M_d 为主机发出的转矩; M_p 为螺旋桨吸收的转矩; M_f 为主机及轴系的摩擦转矩。

一般采用高速开关阀控制的电液执行器作为柴油机转速调节执行机构,控制信号为脉宽调制方式。由于活塞和拉杆的质量很轻,高速开关阀的开关动作很快,因此可忽略不计。所以柴油机可用一个简单的比例环节和一阶惯性环节描述,考虑柴油机扭矩脉冲响应延迟时间,柴油机模型可表示为:

$$G(s) = \frac{ke^{-\tau_0 s}}{T_a s + \beta} \quad (8)$$

式中: k 为增益常数; T_a 为柴油机转速上升时间常数; β 为柴油机自调系数; τ_0 为柴油机扭矩脉冲延迟时间,取决于柴油机的转速、气缸数和冲程数,可按下式估算:

$$15/m \leq \tau_0 \leq (15/m + 60/(q \times m)) \quad (9)$$

式中: q 为汽缸数, τ_0 不超过几十毫秒, 与控制周期相比要小的多, 因此柴油机的调速模型可以简化为 $G(s) = k/(T_a s + \beta)$ 。所以柴油机调速特性可以表示为

$$\dot{m} = \frac{-\beta m}{T_a} + k \frac{n_E}{T_a} \quad (10)$$

1.3 环境扰动数学模型

船在航行过程中时常受到通航环境如风、浪、潮流等的影响, 使航速发生变化。为了简化, 将船体受到的干扰, 作为一个单独的附加阻力项来考虑, 用 w 表示, 这些扰动可以通过以下三种模型模拟^[11,14]:

1) 风和流对船舶的恒值干扰

$$w = \begin{cases} A \times T_0 & t \geq t_0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (11)$$

2) 周期性波浪干扰

$$w = \begin{cases} B \times T_0 \times \sin(\pi t / 5) & t \geq t_0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (12)$$

3) 随机干扰

$$w = C \times T_0 \times H \quad (13)$$

式中: T_0 是螺旋桨的额定推力; A, B, C 是系数; H 是服从标准正态分布的随机变量。

2 非线性 H_∞ 控制器的设计

由以上分析可得船舶航速控制系统的数学模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{n} \\ \dot{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\rho D^4 (1-t_p)}{(1+a)G} K_T (J)n^2 - \frac{r}{(1+a)G} v^s \\ \frac{f(m)}{2\pi I (1+a')} - \frac{\rho D^5}{2\pi I (1+a')} K_Q (J)n^2 \\ -\frac{\beta}{T_a} m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{(1+a)G} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K}{T_a} \end{bmatrix} n_E \quad (14)$$

$$\text{令 } x = \begin{bmatrix} v \\ n \\ m \end{bmatrix}, \quad K_0 = \frac{\beta}{T_a}, \quad K_1 = \frac{\rho D^4 (1-t_p)}{(1+a)G},$$

$$K_2 = \frac{r}{(1+a)G}, \quad K_3 = \frac{1}{2\pi I (1+a')}, \quad K_4 = \frac{\rho D^5}{2\pi I (1+a')},$$

$$K_5 = \frac{1}{(1+a)G}, \quad K_6 = \frac{K}{T_a}, \quad K_T (J)n^2 = f_1(x_1, x_2),$$

$K_Q (J)n^2 = f_2(x_1, x_2)$ 。则航速控制模型可写为:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} K_1 f_1(x_1, x_2) - K_2 x_2^s \\ -K_4 f_2(x_1, x_2) + K_3 f(x_3) \\ -K_0 x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_6 \end{bmatrix} n_E \quad (15)$$

$$\text{其中: } f(x) = \begin{bmatrix} K_1 f_1(x_1, x_2) - K_2 x_2^s \\ -K_4 f_2(x_1, x_2) + K_3 f(x_3) \\ -K_0 x_3 \end{bmatrix},$$

$$g_1(x) = \begin{bmatrix} K_5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad g_2(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_6 \end{bmatrix}, \quad u = n_E。$$

选定输出函数 $h(x) = x_1 = v$, 在 $x = x_0$ 处有

$$L_g L_f^0 h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} g_2(x) = 0 \quad (16)$$

$$L_g L_f h(x) = \frac{\partial L_f h(x)}{\partial x} g_2(x) = 0 \quad (17)$$

$$L_g L_f^2 h(x) = \frac{\partial (L_f^2 h(x))}{\partial x} g_2(x) \neq 0 \quad (18)$$

所以此航速控制系统的相对阶 $r = n = 3$, 满足精确线性化的条件。选取合适的坐标变换, 令 $z = \Phi(x)$, 则:

$$\begin{cases} z_1 = h(x) = x_1 \\ z_2 = L_f h(x) = K_1 f_1 - K_2 x_2^s \\ z_3 = L_f^2 h(x) = \frac{K_1 \partial f_1}{\partial x_1} (K_1 f_1 - K_2 x_2^s) + \left(\frac{K_1 \partial f_1}{\partial x_2} - K_2 s x_2^{s-1} \right) (-K_4 f_2(x_1, x_2) + K_3 f(x_3)) \end{cases} \quad (19)$$

$$\bar{w} = \frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} g_1(x) w = \begin{bmatrix} \frac{\partial z_1}{\partial x_1} & \frac{\partial z_1}{\partial x_2} & \frac{\partial z_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial z_2}{\partial x_1} & \frac{\partial z_2}{\partial x_2} & \frac{\partial z_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial z_3}{\partial x_1} & \frac{\partial z_3}{\partial x_2} & \frac{\partial z_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w = \begin{bmatrix} K_5 \\ K_5 \frac{\partial z_2}{\partial x_1} \\ K_5 \frac{\partial z_3}{\partial x_1} \end{bmatrix} w \quad (20)$$

状态反馈为

$$u = \phi(x) + w^{-1}(x)\bar{u} = -\frac{L_f^3 h(x)}{L_g L_f^2 h(x)} + \frac{1}{L_g L_f^2 h(x)} \bar{u} \quad (21)$$

则非线性控制系统(15)被转化为线性系统的标准 H_∞ 控制问题。

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Az + B_1 \bar{w} + B_2 \bar{u} \\ y &= Cz + D \bar{u} \end{aligned} \quad (22)$$

其中 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。

如图 1 所示为船舶航速控制系统的动态结构图, 其中: r , e , n_E , w 和 v 分别为参考输入、跟踪误差、控制输入、干扰输入和系统输出。针对外部干扰和模型的不确定性, H_∞ 控制器的设计可以归结为混合灵敏度问题。

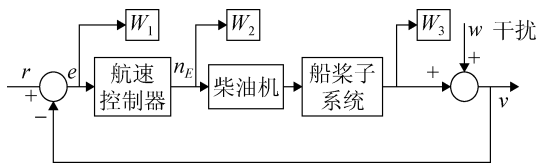


图 1 船舶航速控制系统的动态结构图

图 1 中从 r 至 e , n_E 和 v 的闭环传递函数为

$$S = (I + GK)^{-1} \quad (23)$$

$$R = K(I + GK)^{-1} = KS \quad (24)$$

$$T = GK(I + GK)^{-1} = I - S \quad (25)$$

其中, G 表示系统模型, K 表示控制器。

下面根据线性 H_∞ 理论, 设计船舶航速控制系统的 H_∞ 控制器。在 H_∞ 优化设计中, 加权函数的选择是至关重要的一步。由于 H_∞ 优化控制器阶次等于广义对象, 为了获得低阶次的简单控制器, 在保

证设计要求前提下尽可能选择低阶次的权函数。

本文选取加权函数 $W_1 = \frac{1}{s+10}$, $W_2 = 0.001$, $W_3 = \frac{0.01s}{10s+1}$ 。利用 Matlab 软件, 可求得控制器的传递函数为

$$K(s) = \frac{12370.4(s+7.256)(s^2+s+1)}{(s+10)(s+88.89)(s^2+10.83s+58.74)} \quad (26)$$

结合式(21)可得出船舶航速控制系统的非线性控制器 u 为

$$u = -\frac{L_f^3 h(x)}{L_g L_f^2 h(x)} + \frac{1}{L_g L_f^2 h(x)} \bar{u} = -\frac{L_f^3 h(x)}{L_g L_f^2 h(x)} + \frac{1}{L_g L_f^2 h(x)} Ke \quad (27)$$

当推进器为定距桨时, 船舶航速控制在正常航行工况下是通过控制主机转速来实现的, 而柴油机转速的高低取决于喷油量的多少。船舶航速和主机转速的关系为

$$V = \frac{J \cdot D}{(1-w)} \cdot n \quad (28)$$

其中, n -主机转速; J -实桨进速系数; w -伴流系数; D -螺旋桨直径。

若主机的转速范围为 $[n_{\min}, n_{\max}]$, 则船舶的航速对应的范围为 $\left[\frac{n_{\min} J}{1-w}, \frac{n_{\max} J}{1-w}\right]$ 。通常控制器的输出为直流的电流信号, 通过与被控量之间的函数关系确定, 假定他们满足的函数关系为 $g(\cdot)$, 则控制器的工作区间为

$$g\left(\frac{n_{\min} J}{1-w}\right) \leq u \leq g\left(\frac{n_{\max} J}{1-w}\right) \quad (29)$$

3 仿真分析

以长航集运 8303 为研究对象, 船舶主要参数见表 1。

表 1 长航集运 8303 参数

类型	值	类型	值
船长	118 m	伴流系数	0.279
型宽	9.7 m	推力减额系数	0.223
吃水	7.2 m	相对旋转效率	1
排水量	5 558.2 t	螺旋桨直径	4.203 m

船舶的初始速度为 0 kn, 设定航速为 10 kn, 在这段过程中 H_∞ 非线性控制与采用 PID 控制系统的相应如图 2 所示。

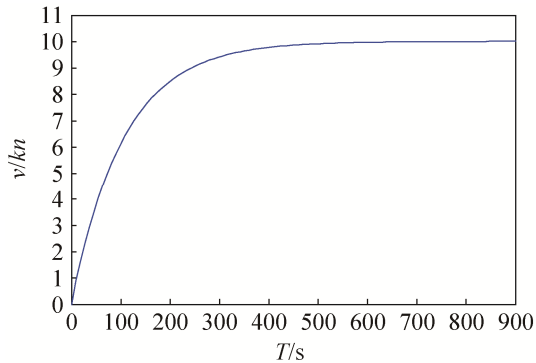


图 2 H_∞ 非线性控制系统动态响应

当通航环境风速在 9~14 m/s 之间随机变化, 周期性波浪, 浪高为 0.2~0.5 m, 水流速为 1 m/s, 并假定风和流对船舶的力为恒值。系统在此环境下的输出相应如图 3 所示。

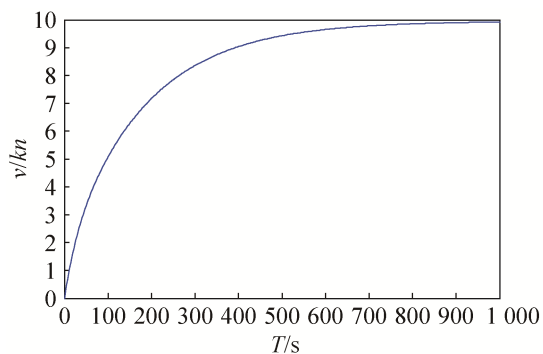


图 3 PID 控制系统动态响应

比较上两种控制策略, 在没有环境的干扰下, PID 控制和非线性 H_∞ 控制都能使系统稳定下来, 但 PID 控制的稳定时间比非线性 H_∞ 控制的稳定时间长。非线性 H_∞ 控制稳定时间约为 650 s, PID 控制稳定时间约为 1 000 s。当存在环境干扰时, 由图 4~5 可以明显看出, 非线性 H_∞ 控制作用下, 虽然系统初期存在振荡, 但仍然在 700 s 左右使系统到达稳定状态, 而 PID 控制时系统不再稳定。

当系统参数发生摄动时, 如矩伴流系数在 [0.20, 0.30] 摄动, 排水量在 [5 557.2, 5 559.2] 摄动,

推力额减系数在 [0.18, 0.25] 摄动, 螺旋桨直径在 [4.103, 4.303] 摄动, 此时在这两种控制器作用下, 参数摄动由小至大过程中系统的阶跃输出响应如图 6 和 7 所示。

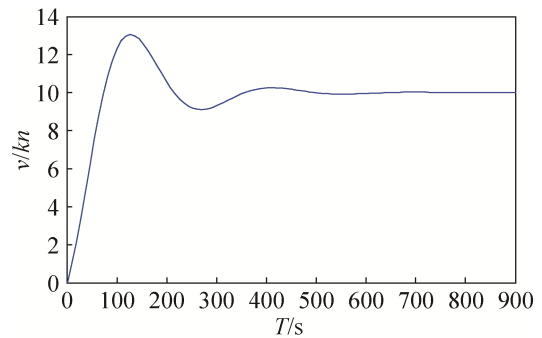


图 4 环境干扰下 H_∞ 非线性控制系统动态响应

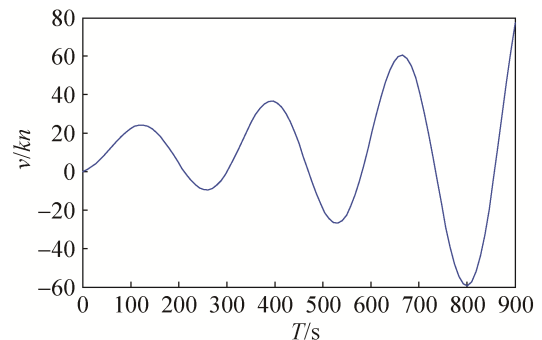
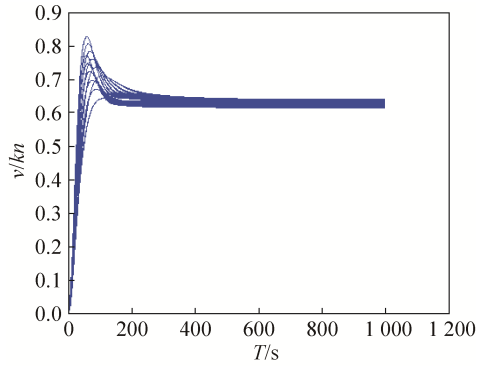
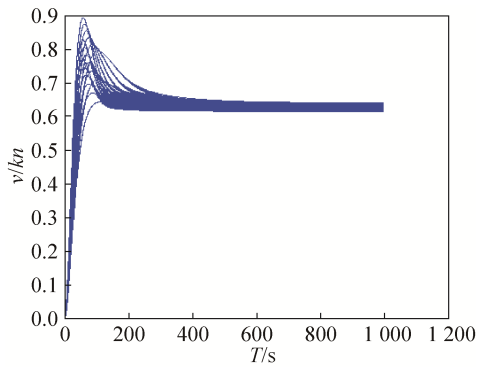


图 5 环境干扰下 PID 控制系统动态响应

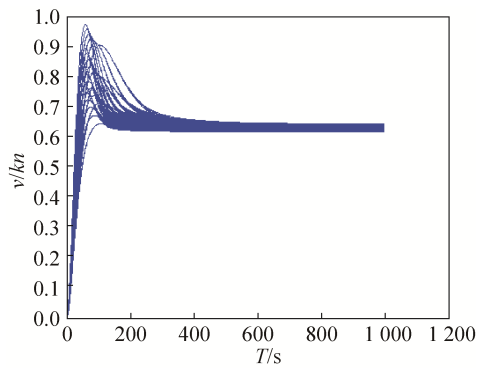
采用 PID 控制时, 船舶设定值为 1 kn。在系统参数发生摄动由小到大的过程中, PID 控制的系统刚开始比较稳定, 随着摄动的增大, 出现超调并且发生剧烈的振荡, 且稳定时间边长, 当系统参数摄动继续增大时, 整个系统不再稳定(见图 7(a)→(b)→(c)→(d))。采用非线性 H_∞ 控制时船舶设定为 0.6 kn, 在系统参数摄动不大时, 系统的超调量略有增加, 稳定时间基本不变在 400~600 s 之间(见图 6(a)→(b)→(c))。当参数摄动进一步加大时, 系统逐渐发生振荡, 稳定时间变长, 约为 800 s, 但最后仍能使系统稳定下来, 如图 6(d)。因此非线性 H_∞ 控制比 PID 控制有更强的抗干扰能力和鲁棒性能。



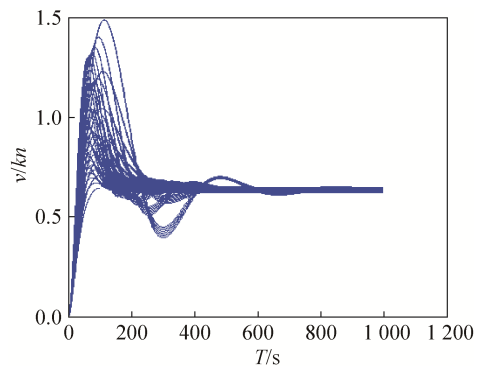
(a) 参数扰动由小到大前期系统输出响应



(b) 参数扰动由小到大中期系统输出响应

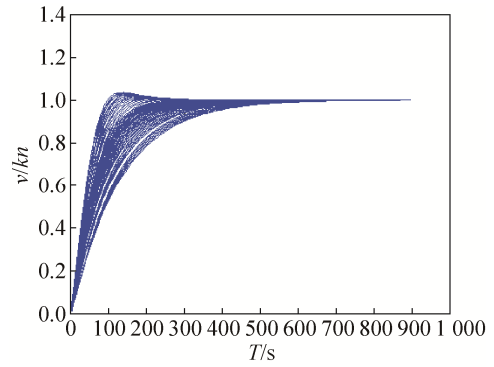


(c) 参数扰动由小到大后期系统输出响应

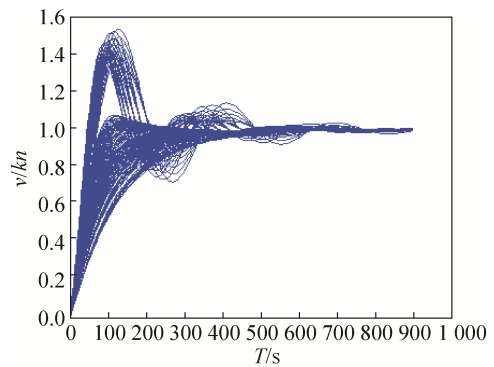


(d) 参数扰动由小到大末期系统输出响应

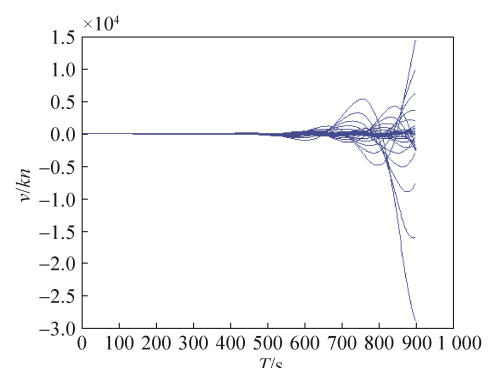
图 6 系统参数扰动时非线性 H_∞ 控制系统的动态响应过程



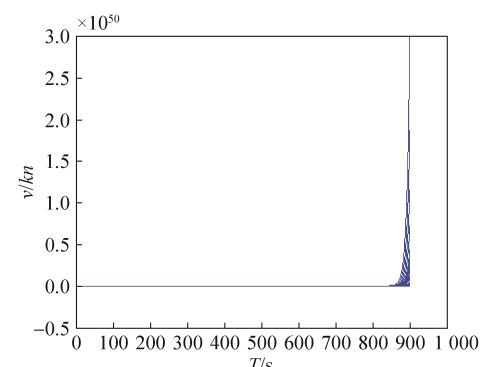
(a) 参数扰动由小到大前期系统输出响应



(b) 参数扰动由小到大中期系统输出响应



(c) 参数扰动由小到大后期系统输出响应



(d) 参数扰动由小到大末期系统输出响应

图 7 系统参数由小到大扰动时 PID 控制系统的动态响应过程

4 结论

本文建立了船舶航速控制系统的非线性数学模型, 并考虑了环境干扰的影响。然后运用微分几何理论, 将系统精确线性化。在分析模型不确定性的基础上, 运用线性 H_∞ 控制理论设计了航速控制系统的 H_∞ 控制器。通过仿真发现非线性 H_∞ 控制器和 PID 控制器都能使系统达到很好的稳定状态, 但存在干扰或系统参数摄动较大时, PID 控制的系统不再稳定, 而非线性 H_∞ 控制器仍能使系统保持稳定。因此非线性 H_∞ 控制器具有更强的鲁棒稳定性和抗干扰能力。

参考文献:

- [1] 高键, 李众, 王建华, 等. 可调螺距螺旋桨模糊控制系统 [J]. 船舶工程, 2000, 124(1): 32-34.
- [2] 高键, 姜长生. 调距桨的舰船航速智能控制技术研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(2): 157-161.
- [3] Desanj D S, Grimble M J, Katebi M R. State space H_∞ adaptive controller with application to a ship control system [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control (S0142-3312), 1997, 19(3): 139-153.
- [4] 周耀庭, 谢成祥, 李骏, 等. 舰船航速模糊控制系统仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 1999, 11(4): 289-292. (Zhou Y T, Xie C X, Li J, et al. A Simulation of Fuzzy Control System for Ship Marine Speed [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 1999, 11(4): 289-292.)
- [5] Wang Yuchao, Fu Quanxuan, Liu Fanming. Ship speed control method based on fuzzy-cerebellar model articulation controller [C]// Proceedings of the 31st Chinese Control Conference, Hefei, China. USA: IEEE Computer Society, 2012: 4396-4399.
- [6] 曾庆军, 谢成祥, 徐绍芬, 等. 基于遗传算法的舰船航速模糊控制研究 [J]. 船舶工程, 1999, 6: 13-15, 23.
- [7] Farouk N, Sheng L, Said L. Speed control system on marine diesel engine based on a self-tuning fuzzy PID controller [J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology (S2277-9442), 2012, 4(6): 686-690.
- [8] Rodriguez F O, Rubio J J, Gaspar C R M, et al. Hierarchical fuzzy CMAC control for nonlinear systems [J]. Neural Computing and Applications (S0941-0643), 2013, 23(1): 323-331.
- [9] Davari M, Mohamed Y A R I. Variable Structure Based Nonlinear Control for the Master VSC in DC-Energy-Pool Multiterminal Grids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2014, 29(11): 6196-6213.
- [10] 王崇伦, 李振龙, 盖彦荣, 等. 车辆换道轨迹滑模跟踪控制研究 [J]. 交通信息与安全, 2012, 30(5): 39-44.
- [11] Fossen T I. Guidance and Control of Ocean Vehicles [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 1994.
- [12] Outbib R, Dovifaaz X, Rachid A, et al. Speed control of a diesel engine: a nonlinear approach [C]// American Control Conference, Proceedings of the 2002, IEEE. USA: IEEE, 2002, 4: 3293-3294.
- [13] Wang H P, Bosche J, Tian Y, et al. Hybrid adaptive control used in diesel engine speed regulation [C]// Control & Automation (MED), 2011 19th Mediterranean Conference. USA: IEEE, 2011: 736-741.
- [14] 谢成祥, 曾庆军, 周隽. 船舶航速的动态矩阵控 [J]. 华东船舶工业学院学报(自然科学版), 2001, 15(3): 5-9.