

一种变形的回路成形控制器及其应用*

张显库 贾欣乐 王兴成
(大连海事大学轮机工程研究所 116026)

摘要 给出一种变形的回路成形控制器, 并从理论上分析了将常规的回路成形控制器变形后能够改善系统动态性能所需的条件。将其应用于船舶自动舵的设计, 获得了满意的控制结果。

关键词 船舶自动舵, 回路成形控制器, 变形

分类号 TP 13

A Kind of Transfigured Loop Shaping Controller and Its Application

Zhang Xianku, Jia Xinle, Wang Xingcheng
(Dalian Maritime University)

Abstract A kind of transfigured loop shaping controller is presented. The condition that the transfigured controller can improve the dynamic performance of the system is given by theoretical analysis. Satisfied control results are acquired when it is applied to the design of autopilot for ships.

Key words autopilot for ships, loop shaping controller, transfiguration

1 引言

用船舶的 Nomoto 模型进行鲁棒控制器设计有两个好处: 一是在低频范围, 其频谱与复杂的高阶模型的频谱非常相近; 二是设计出的控制器阶次低, 易于实现^[1]。但船舶的 Nomoto 模型本身在虚轴上有一个极点, 直接用 H 标准问题设计会发生困难。常规的解决方法是将虚轴极点加上一个非常小的数或整个模型左移一常数^[2]。而 Matlab 4.2 软件包中给出的 H 控制算法示例, 根据实际工程应用在被控对象前加一零阶保持器, 用此方法进行船舶 H 鲁棒控制器设计, 其 Nomoto 模型无需做任何改变^[3]。

如果用回路成形方法设计 H 鲁棒控制器, 以解决 Nomoto 模型虚轴极点的问题, 在实际应用中发现, 其控制的超调量稍大, 靠不断迭代调整成形权函数来解决这一问题效果不大, 而且权函数的调整需要大量的实践经验。本文将回路成形控制器稍加变形, 控制效果则有较大改善。经过系统性分析, 得到一种新的回路成形控制器。

2 变形的回路成形控制器

回路成形 H 控制理论是通过选择权函数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。文献[2]给出了回路成形的算法及控制器设计步骤。常规的回路成形 SISO 系统结构如图 1 所示, 其中 W 为 G 的成形权函数。

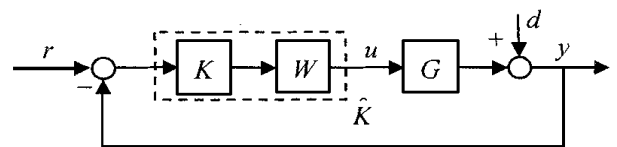


图 1 常规的回路成形 SISO 系统结构

设回路成形算法算出的传递函数形式控制器 K 的直流分量为 K_0 , K_0 等于 K 的分子常数除以分母的常数。变形的回路成形控制系统如图 2 所示。

变形的回路成形系统将控制器 K 置于反馈回路上, 而将控制器的直流增益置于设定的输入线上。由图 1 知, 控制器 K 放在前向通道上和放在反馈通道上, 从干扰 d 到输出 y 的传函不变, 故变形的回路

* 1998-06-22 收稿, 1998-09-14 修回

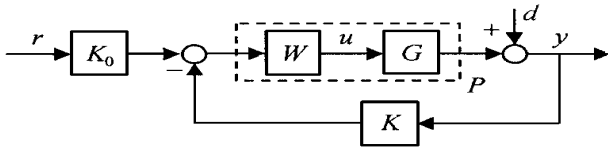


图 2 变形的回路成形系统结构

成形控制器对干扰的影响也不变。

现在分析变形的回路成形对参考信号 r 的影响。为便于分析, 设系统为 SISO 系统, 且

$$P = GW = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \quad (1)$$

其中, $m < n$, 即 P 是真的; 而

$$K = \frac{d_p s^p + d_{p-1} s^{p-1} + \dots + d_0}{c_q s^q + c_{q-1} s^{q-1} + \dots + c_0} \quad (2)$$

其中, $p < q$, 即 K 是真的; $K_0 = d_0/c_0$

变形的回路成形对参考信号 r 的影响分为两种情况:

1) 对系统稳态的影响: 设参考信号为阶跃信号, 幅值为 r_0 。根据终值定理, 系统的稳态为

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \frac{PK}{1 + PK} \frac{r}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{(b_m s^m + \dots + b_0)(d_p s^p + \dots + d_0)}{(a_n s^n + \dots + a_0)(c_q s^q + \dots + c_0) + (b_m s^m + \dots + b_0)(d_p s^p + \dots + d_0)} r = \frac{b_0 d_0}{a_0 c_0 + b_0 d_0} r = \frac{b_0 K_0}{a_0 + b_0 K_0} r = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{PK_0}{1 + PK} \frac{r}{s} \quad (3)$$

故回路成形控制器经变形后对系统的稳态不会产生影响。

2) 对系统动态的影响: 由于

$$\frac{y}{r} = \frac{PK_0}{1 + PK} = \frac{PK}{1 + PK} K_0 K^{-1} \quad (4)$$

因此变形后的系统相当于变形前的系统加上一个校正系统 $K_0 K^{-1}$ 。如果 $K_0 K^{-1}$ 具有低通和高阻特性, 那么常规的回路成形系统经变形后便可改善系统的动态性能。但控制器变形后, 用常规的反馈控制系统概念解释其工程意义比较困难。通过观察和分析看出, 可将控制器的直流增益理解为一种前馈比例控制器, 这样就和 H 控制的双自由度问题有着异曲同工之效^[4]。

双自由度控制(TDF)就是通常意义上的前馈加反馈控制, 其框图如图 3 所示。当设计者面临特定的动态和/或静态性能指标, 比如跟踪理想参考模型的响应要求时, 单自由度控制(常规反馈控制)往

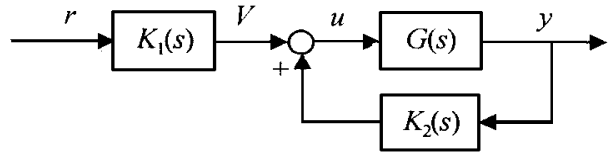


图 3 双自由度控制系统结构

往以牺牲闭环系统的鲁棒稳定性为代价, 此时就能体现出双自由度控制的优越性。两个自由度的系统使得在设计时有折衷性能指标和鲁棒稳定性的余地。

3 变形的回路成形控制器应用于船舶自动舵

船舶航向保持是一个典型的 SISO 问题。取舵角 δ 为被控对象输入, 航偏角 $\Delta\psi$ 为被控对象输出, 可得到被控对象的 Nomoto 传递函数数学模型

$$G_{\psi\delta}(s) = K_0 / (T_0 s + 1) \quad (5)$$

以大连远洋运输公司的阳澄湖号油轮为例, 其船舶参数为: 两柱间长 149m, 型宽 22m, 夏季吃水 9.214m, 满载排水量 25 123t, 营运航速 13.5kn, 方形系数 0.809, 舵叶面积 20.4m², 重心到中心距离 3.38m。由上述数据可计算出满载时船舶 Nomoto 模型中的 K, T 指数为: $K_0 = 0.321/s, T_0 = 342.12s$ 。

选择成形权函数 $W(s) = 0.2(s+1)/(s+0.2)$, 用文献[2]给出的回路成形控制器设计算法, 在 Matlab 4.2 软件包中编程进行回路成形控制器设计, 得到的控制器为

$$K(s) = \frac{53.2876s^2 + 11.3983s + 0.1482}{s^3 + 22.1732s^2 + 5.9803s + 0.3607} = \frac{0.411(s/0.2 + 1)(s/0.014 + 1)}{(s/21.9 + 1)(s/0.182 + 1)(s/0.091 + 1)} K_0 = 0.411$$

图 4 给出了用 Matlab 4.2 中 Simulink 编制的回路成形鲁棒控制算法设计及变形的回路成形仿真窗口。在输入船舶对象和成形权函数的传函后, 即可获得新的回路成形控制器; 然后开始仿真, 舵令和航向以曲线形式给出。

图 5 给出了回路成形控制器变形前和变形后的仿真结果(设定航向为 10°)。从两组曲线的对比可以看出, 变形后的回路成形控制器超调量减小了 35%, 舵令也随之减小, 从而改善了控制效果, 节约了能源。

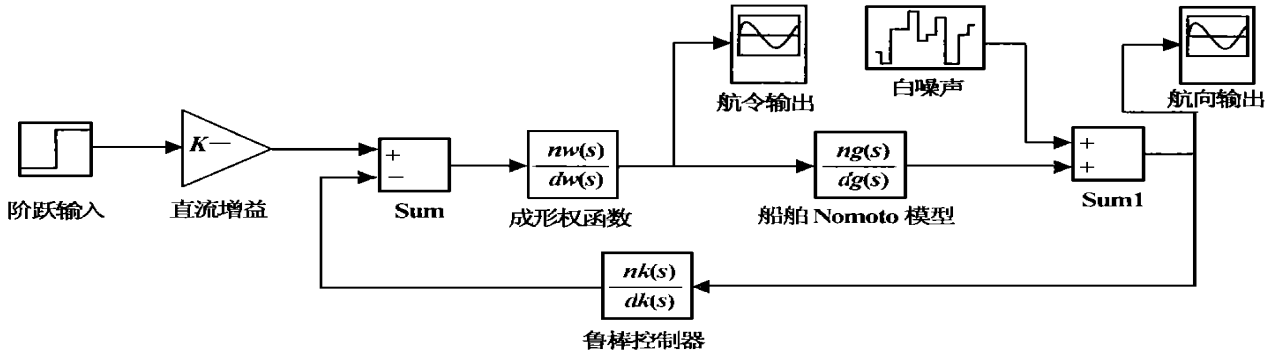


图4 回路成形鲁棒控制算法设计及变形的回路成形仿真窗口

论上分析了如果 K_0K^{-1} 具有低通和高阻特性, 那么常规的回路成形控制器变形后能够改善系统的动态性能. 将其应用于船舶自动舵的设计, 获得了满意的控制结果.

参考文献

- 1 贾欣乐, 张显库. H_∞ 控制器应用于船舶自动舵. 控制与决策, 1995, 10(3): 250—254
- 2 Zhou K, J C Doyle, Keith Glover. Robust and optimal control. New Jersey: Prentice Hall, 1996
- 3 Richard Y Chiand, Michael G Safonov. Robust control toolbox. The Mathworks Inc 1997
- 4 S Hara, T Sugie. Independent parametrization of two-degrees-of-freedom compensators in general robust tracking systems. IEEE Trans on Autom Contr, 1988, 33: 59_ 67

作者简介

张显库 男, 1968 年生. 1998 年在大连海事大学获博士学位, 现为大连海事大学副教授. 研究方向为鲁棒控制, 计算机软件开发, 轮机工程.

贾欣乐 男, 1932 年生. 1959 年毕业于清华大学, 现为大连海事大学教授, 博士生导师. 研究方向为鲁棒控制, 轮机工程等.

王兴成 男, 1956 年生. 1991 年在东北大学获博士学位, 现为大连海事大学教授. 研究方向为鲁棒控制等.

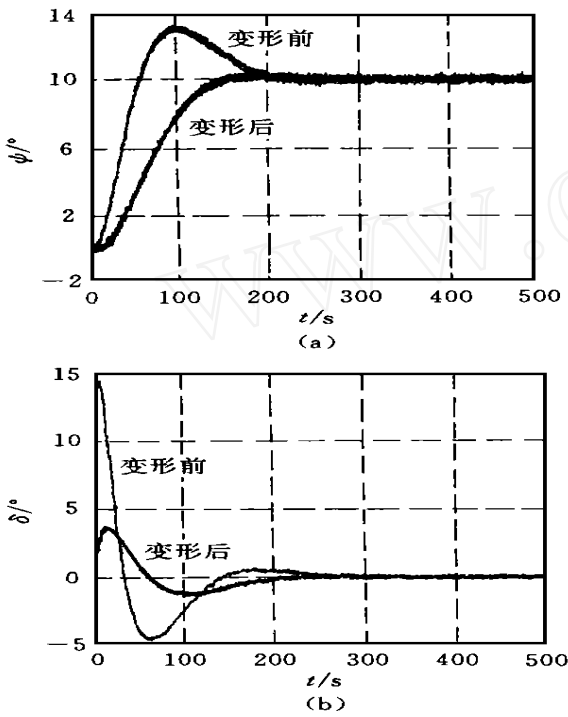


图5 回路成形控制器变形前后的对比 (a) ψ 仿真结果 (b) δ 仿真结果

4 结 论

本文给出一种变形的回路成形控制器, 并从理

(上接第 115 页)

- 5 杨智, 刘希远. 时变分数时滞系统最优预报自校正极点配置 PD 控制算法. 控制理论与应用, 1992, 9(3): 292—295
- 6 Eiben A E. Global convergence of genetic algorithm: An infinite Markov chain analysis. In: Paraller Problem Solving from Nature. Berlin: Springer-Verlag, 1991. 4—12
- 7 邵裕森. 自动控制系统: 工业生产自动控制系统.

北京: 中央广播电视大学出版社, 1988. 19—21

作者简介

杨智 男, 1961 年生. 1988 年在甘肃工业大学获工学硕士学位, 现为该校电气与信息工程系副主任, 教授. 研究方向为过程控制, 智能控制, 大时滞系统的稳定性及控制等.

高靖 女, 1973 年生. 1996 年于吉林工业大学获学士学位, 1999 年于甘肃工业大学自控理论与应用专业获硕士学位. 研究方向为过程控制, 智能控制等.