

# 基于 GM(0,2)模型的灰色 PID 自动舵设计

曾小权, 边信黔, 王元慧

ZENG Xiao-quan, BIAN Xin-qian, WANG Yuan-hui

哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001

Department of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

E-mail: fweb@163.com

ZENG Xiao-quan, BIAN Xin-qian, WANG Yuan-hui. Grey PID control autopilot design based on GM (0,2) model. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(28): 239-241.

**Abstract:** Concerning the ship course control system with the uncertain parameter variations and the input disturbances, and by comparing the advantages of the algorithm of grey PID control and the disadvantages of the algorithm of traditional PID type, the grey PID control autopilot for ships has been presented based on the model of GM(0,2) with regarding Nomoto's equation as the normal equation. The simulation research has implemented on the platform of the VC++.NET, and shows that the grey PID control autopilot can control the course effectively.

**Key words:** ship; grey PID control; autopilot; course control; GM(0,2) model

**摘要:** 考虑到船舶航向控制系统模型中存在参数不确定和外界干扰不确定性, 比较在不确定项影响下灰色 PID 控制算法优点和传统 PID 控制算法的缺点, 利用野本模型作为船舶航向控制系统的模型, 提出了基于 GM(0,2)模型船舶航向灰色 PID 自动舵的控制算法, 并且利用 VC++.NET 进行了仿真研究, 仿真结果显示灰色 PID 设计的自动舵能够很好地控制航向。

**关键词:** 船舶; 灰色 PID; 自动舵; 航向控制; GM(0,2)模型

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.28.078 文章编号: 1002-8331(2008)28-0239-03 文献标识码: A 中图分类号: TP391.9

## 1 引言

船舶的航向控制是通过操纵舵的运动来完成, 舵的操纵性能对于船舶的使用效能和安全性都有直接关系。目前我国大多数船舶上装备的是 PID 型自动舵, 传统的 PID 自动舵控制算法即比例积分微分控制算法, 该算法简单、鲁棒性好、可靠性高, 但是对于非线性、时变不确定和大时滞对象, PID 控制算法的控制品质不是很高。因此, 出现了自适应、鲁棒、变结构等控制方法同 PID 控制算法相结合的一系列控制算法。

船舶在航行过程中, 由于航速、装载、外界扰动等变化, 船舶航向控制系统模型具有明显的不确定性, 传统 PID 型控制律自动舵难以应付这种不确定性。本文利用标称的航向控制系统模型(即一阶野本模型), 设计传统的 PID 型控制律, 在此基础上, 考虑船舶控制系统模型中存在参数不确定性和外界干扰不确定性, 提出了基于 GM(0,2)模型的船舶灰色 PID 自动舵的控制算法。最后, 以“育龙”号为例, 进行了传统 PID 型自动舵和灰色 PID 型自动舵对比仿真研究。

## 2 船舶航向控制系统模型

在船舶航向自动舵设计时, 船舶航向控制系统模型一般采用野本模型<sup>[1]</sup>:

$$T_0 \ddot{\psi} + \dot{\psi} = K_0 \delta \quad (1)$$

式中,  $\psi$  为航向;  $\delta$  为舵角;  $T_0$ 、 $K_0$  为标称模型的参数, 一般可以表示为  $T_0 = T' L / V$ 、 $K_0 = K' L / V$ 。其中:  $V$  为船速,  $L$  为船长,  $T'$ 、 $K'$  为模型的无量纲系数, 一般由海上实船实验获得。

船舶在航行中, 船速、装载状态等都是变化的, 同时还受风、浪、流等外界干扰影响, 式(1)中系数并不能总是完全确定。因此船舶航向控制系统模型可采用下列不确定性的模型。

$$(T_0 + \Delta T) \ddot{\psi} + \dot{\psi} = (K_0 + \Delta K) \delta + \omega \quad (2)$$

式中:  $\Delta T$ 、 $\Delta K$  为参数不确定项;  $\omega$  为外界扰动的不确定性项。

## 3 船舶航向 PID 型自动舵设计

船舶航向控制框图简化如图 1 所示。

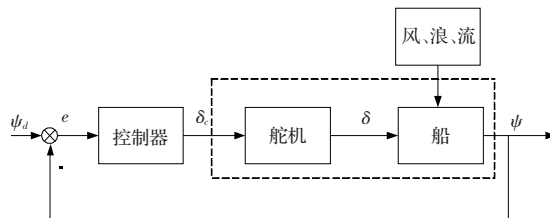


图 1 船舶航向控制结构框图

在传统 PID 型自动舵设计时, 采用的船舶航向控制系统模型都为标称模型, 即:

**作者简介:** 曾小权(1982-), 男, 硕士生, 主要研究领域为船舶运动控制系统仿真; 边信黔(1941-), 男, 博士生导师, 教授, 主要研究领域为船舶运动综合仿真; 王元慧(1981-), 女, 博士生, 助教, 主要研究领域为 HLA 综合仿真技术。

收稿日期: 2007-11-13 修回日期: 2008-03-06

$$T_0 \ddot{\psi} + \dot{\psi} = K_0 \delta \quad (3)$$

式中参数  $T_0, K_0$  为已知。

若设定航向为  $\psi_d$ , PID 型航向自动舵的控制律为:

$$\delta = K_p e + K_d \dot{e} + K_i \int_0^t e \, dt \quad (4)$$

式中:  $e = \psi_d - \psi$  ( $\psi_d$  是设定航向,  $\psi$  是输出航向);  $K_p, K_i, K_d$  为 PID 型自动舵的设计参数<sup>[2]</sup>。

#### 4 船舶航向灰色 PID 自动舵设计

针对船舶航行过程中存在的不确定性,采用灰色 PID 控制算法的自动舵,能够对系统不确定部分建立灰色模型,进行灰色预估补偿,可以提高自动舵控制品质及其鲁棒性。

##### 4.1 船舶灰色 PID 自动舵的航向控制模型

将公式(2)写成:

$$\ddot{\psi} = -\frac{1}{T_0 + \Delta T} \dot{\psi} + \frac{K_0 + \Delta K}{T_0 + \Delta T} \delta + \frac{1}{T_0 + \Delta T} \omega \quad (5)$$

若取  $x_1 = \psi, x_2 = \dot{\psi}, u = \delta$  将上述传递函数转化为状态方程式得:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_0}{T_0} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ c_1 \end{bmatrix} \omega \quad (6)$$

将上式转化成下列形式:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t) + bD(x, t) \quad (7)$$

其中,  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_0} \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_0}{T_0} + b_1 \end{bmatrix}$ , 外干扰为  $D(x, t) = V_1 x_1 + V_2 x_2 + f$ ,

$a_1 = \frac{\Delta T}{T_0(T_0 + \Delta T)}, b_1 = \frac{T_0 \Delta K - K_0 \Delta T}{T_0(T_0 + \Delta T)}, c_1 = \frac{1}{T_0 + \Delta T}, V_1 = 0, V_2 = a_1 / (K_0 / T_0 + b_1), f = c_1 \omega$ 。式中,  $x \in R^2, u \in R, A$  为  $2 \times 2$  维矩阵,  $D(x, t) \in R, b$  为 2 维列向量。 $bD(x, t)$  代表系统满足匹配条件的不确定部分,包括参数不确定(与状态  $x$  成比例)和外干扰(与状态  $x$  无关)。

离散化为:

$$D(x, k) = \frac{1}{b} (\dot{x}(k) - Ax(k) - bu(k)) \quad (8)$$

式中,  $t = kT, T$  为采样时间。

##### 4.2 灰色 PID 自动舵控制算法

对于航向控制系统式(7),定义误差变量:

$$e = \psi_d - \psi \quad (9.1)$$

$$\dot{e} = \dot{\psi}_d - \dot{\psi} \quad (9.2)$$

灰色 PID 自动舵控制算法的步骤为:

**步骤 1** 采用 PID 控制,在控制器启动过程中,首先采用灰色估计器对不确定部分的模型参数建立 GM(0,2)模型进行估计,其中 PID 控制算法为:

$$u_p = u(t) = k_p e(k) + k_i \sum_{k=1}^n e(k) T + k_d \dot{e}(k) \quad (10)$$

用灰色估计器对不确定部分的模型参数建立 GM(0,2)模型的具体算法为:

(1)建立原始离散数列  $x_i^{(0)}(k)$ , 其中  $i=1, 2; k=1, 2, \dots, N; N \geq 2$ ;

$$x_1^{(0)} = (x_1^{(0)}(1) \ x_1^{(0)}(2) \ \dots \ x_1^{(0)}(N)) \quad (11)$$

$$x_2^{(0)} = (x_2^{(0)}(1) \ x_2^{(0)}(2) \ \dots \ x_2^{(0)}(N))$$

(2)计算一次累加生成(1-AGO)数列,其中  $i=1, 2; k=1, 2, \dots, N; N \geq 2$ :

$$x_1^{(1)} = (x_1^{(1)}(1) \ x_1^{(1)}(2) \ \dots \ x_1^{(1)}(N)) \quad (12)$$

$$x_2^{(1)} = (x_2^{(1)}(1) \ x_2^{(1)}(2) \ \dots \ x_2^{(1)}(N))$$

(3)计算数据矩阵  $B$ , 其  $B^T B$  必须可逆(即  $|\det(B^T B)| > \varepsilon > 0$ );若不可逆,则应适应增加  $N$ ,直到  $B^T B$  可逆;

$$B = \begin{bmatrix} x_1^{(1)}(2) & x_2^{(1)}(2) & 1 \\ x_1^{(1)}(3) & x_2^{(1)}(3) & 2 \\ x_1^{(1)}(4) & x_2^{(1)}(4) & 3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

(4)计算离散数列  $D^{(0)}(k), k=1, 2, 3$ :

$$D^{(0)} = (D^{(0)}(1) \ D^{(0)}(2) \ D^{(0)}(3))^T \quad (14)$$

(5)计算(1-AGO)离散数列  $D^{(1)}(k), k=1, 2, 3$ :

$$D^{(1)}(k) = \sum_{l=1}^k D^{(0)}(l) \quad (15)$$

$$D^{(1)} = (D^{(1)}(1) \ D^{(1)}(2) \ D^{(1)}(3))^T \quad (16)$$

(6)估计不确定部分  $bD(x, t)$  的灰色模型  $D^{(1)}(x, t)$  的参数向量  $\hat{V}^T$ :

$$D^{(1)}(x, t) = V_1 x_1^{(1)} + V_2 x_2^{(1)} + f \quad (17)$$

$$\hat{V}^T = (B^T B)^{-1} B^T D^{(1)} \quad (18)$$

$$\hat{V}^T = (\hat{V}_1 \ \hat{V}_2 \ \hat{f})^T \quad (19)$$

**步骤 2** 按估计参数加上补偿控制,估计器停止工作,灰色 PID 控制算法为:

$$u = u_p + u_c \quad (20)$$

其中:  $u_c = - \left[ \sum_{i=1}^2 \hat{V}_i x_i + \hat{f} \right]$ 。

#### 5 仿真实例

本文以“育龙”号为例进行仿真研究,该船的船长  $L$  为 126 m,船宽  $B$  为 20.8 m,满载吃水  $d$  为 8.0 m,方形系数  $C_b$  为 0.681。

利用模型参数,可以通过计算求得  $K' = 7.926 \ 9, T' = 13.88, K_0 = K' V_0 / L, T_0 = T' L / V_0$ 。设船舶运动的初始速度  $V_0 = 7.2$  m/s,则可求得  $K_0 = 0.453, T_0 = 242.9$ 。

假设系统参数的不确定项是由船速变化引起的,船速变化量  $\Delta V$ , 则模型不确定参数项分别为  $\Delta K = K_0 \Delta V / V_0, \Delta T = -T_0 \Delta V / (V_0 + \Delta V)$ , 干扰项  $\omega$  的计算见文献[3],进而可求出  $D(x, t)$ 。

假设船舶的设定航向  $\psi_d = 10^\circ$ , 针对以下 3 种情况进行仿真研究:

(1)无不确定影响项下,取自动舵 PID 控制律的参数分别为  $K_p = 2.4, K_i = 0.000 \ 002 \ 1, K_d = 36$ , 两种控制器航向及舵角变化曲线如图 2、图 3 所示。

(2)有不确定影响下,而取  $\Delta V = 6$  kn,通过计算得干扰参数  $V = [0 \ -0.463 \ 6 \ 0.2]$ , PID 控制的参数同情况 1。经过 4 个采样时间,得到干扰参数估计值  $\hat{V} = [-0.004 \ 7 \ -0.506 \ 4 \ 0.201 \ 4]$ , 两种控制器航向及舵角变化曲线如图 4、图 5 所示。

(3)在情况 2 的基础上将  $K_i$  的值调大,取  $K_i = 0.001 \ 1$ , 得到

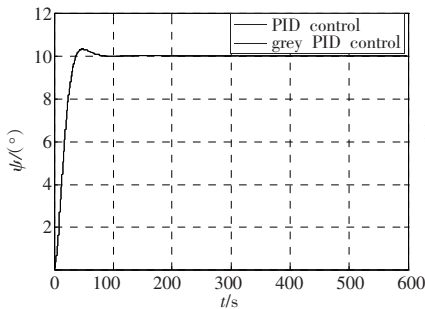


图2 无不确定项影响下的航向变化曲线

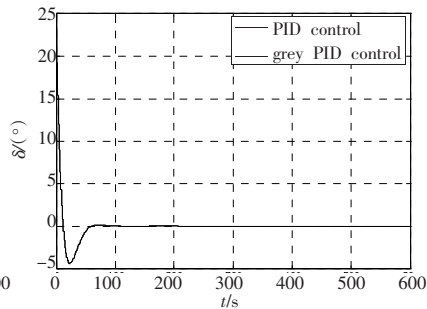
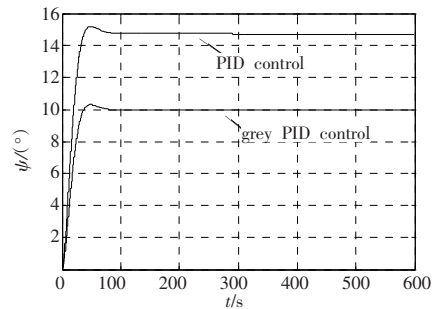
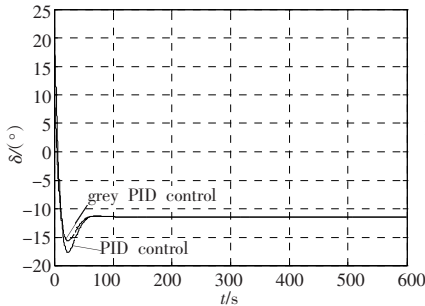
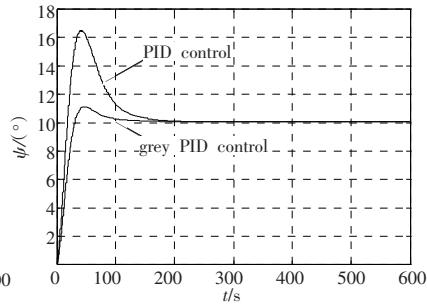
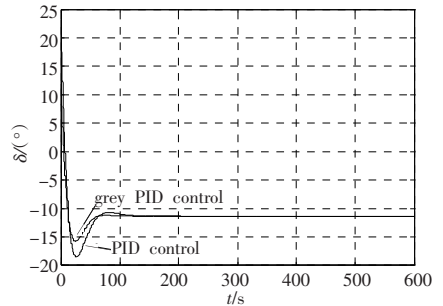


图3 无不确定项影响下的舵角变化曲线

图4 有不确定项影响下的航向变化曲线( $K_i$ 较小)图5 有不确定项影响下的舵角变化曲线( $K_i$ 较小)图6 有不确定项影响下的航向变化曲线( $K_i$ 较大)图7 有不确定项影响下的舵角变化曲线( $K_i$ 较大)

干扰参数估计值  $\hat{V}=[0.416\ 2\ 2.756\ 9\ 0.201\ 2]$ , 两种控制器航向及舵角变化曲线如图6、图7所示。

从图2、图3中可以看出在没有外界不确定影响下,传统PID控制和灰色PID控制的控制效果基本上一样,都能将船舶的航向稳定到设定航向值;当存在外界不确定影响下,在相同的  $K_p$ 、 $K_d$  的控制参数下,在  $K_i$  较小时,传统的PID控制会产生一定量的稳态误差,而 Grey PID control 能很好地稳定在设定值上,从仿真图4、图5可以看出;同样,在较大时,虽然传统PID能够稳定在设定值上,但是有较大的超调,而 Grey PID control 的控制效果依然比较好,从仿真图6、图7中明显看出。总之,对于考虑参数不确定项和外界扰动不确定项的航向控制系统,灰色PID控制效果较传统PID控制好,灰色PID控制的稳态误差小,超调量小,响应时间短,系统的性能得到了较大的改善,鲁棒性大为提高<sup>[4]</sup>。同时,说明了基于GM(0,2)模型的灰色PID控制算法在船舶航向自动舵中的设计的可行性。

## 6 结论

仿真发现,对于不确定船舶航向控制的系统,如果只采用传统的PID型自动舵来控制航向,控制效果不太理想,然而,灰色PID控制算法设计的船舶自动舵能够使船舶很好地保持到期望的航向,这主要归结于其采用了灰色预估补偿原理,其航向控制系统能够具有良好的控制品质和鲁棒性。

## 参考文献:

- [1] 贾欣乐,杨盐生.船舶运动数学模型—机理建模与辨识建模[M].大连:大连海事大学出版社,1999.
- [2] 杨盐生,于晓利,贾欣乐.船舶航向自适应鲁棒PID自动舵设计[J].武汉交通科技大学学报,1999,23(6):594-598.
- [3] 杨盐生.不确定系统的鲁棒控制及其应用[M].北京:科学出版社,2004.
- [4] 熊合金,徐华中.灰色控制[M].北京:国防工业出版社,2005.

(上接232页)

光谱特征参数提取,然后再选择合适的吸收峰波段作为输入向量进行分类。这是一个带缺失属性值的不完整高光谱数据分类问题,本文对三种分类算法的分类结果进行了比较和分析。

虽然决策树、朴素贝叶斯、朴素贝叶斯树等分类算法都是比较成熟的技术,但是这些技术并不是放之四海而皆准的方法,针对不同的数据集需要对算法本身进行针对性的改进;另外,由于高光谱数据自身的特点,对数据进行有效的预处理也是值得进一步研究的方向。

## 参考文献:

- [1] 浦瑞良,宫鹏.高光谱遥感及其应用[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [2] 吴昊.高光谱遥感图像数据分类技术研究[D].长沙:国防科技大学,

2004.

- [3] 周前祥,敬忠良.基于非线性神经网络的高清晰高光谱遥感图像分类器设计与应用[J].宇航学报,2005,26:126-129.
- [4] 熊桢.用于高光谱遥感图像分类的一种高阶神经网络算法[J].中国图象图形学报,2000,5(3):197-199.
- [5] 杜培军.基于支持向量机的高光谱遥感分类进展[J].测绘通报,2006(12):37-40.
- [6] Han J, Kamber M.数据挖掘—概念与技术[M].范明,孟小峰,译.北京:机械工业出版社,2001.
- [7] Witten I H, Frank E. Data mining: practical machine learning tools and techniques with java implementations [M]. Seattle, WA: Morgan Kaufmann, 2005.
- [8] Friedman N, Geiger D, Goldszmidt M. Bayesian network classifiers [J]. Machine Learning, 1997, 29(2/3): 131-161.