

具有可变性能指标的自校正 自适应控制理论的研究

刘思行

张炎华

周兆英

(清华大学精密仪器系 100084) (上海交通大学精密仪器系 200030) (清华大学精密仪器系 100084)

摘 要

本文在广义最小方差基础上提出了具有可变性能指标函数的自校正控制方案, 依据所要求的特征方程之根在线地改变权函数来确定控制律。本方案控制的算法不仅简单而且容易实现。计算机模拟仿真结果表明此控制律性能优于一般的自校正控制律, 最终利用本文的方案对船舶航向实施自校正控制进行了讨论并实现了在“大明山”号轮船上的实际海试, 结果表明性能优良。

关键词: 广义最小方差, 极点配置, 自校正自适应控制。

1 概述

最初由 Kalman 提出基本思想的自校正控制理论经 Åström 等发展成最小方差自校正控制和由 Clarke, Gawthrop 进一步发展成广义最小方差自校正控制以来已越来越多地被用于众多的工业过程控制^[1,2]。自校正控制的性能指标很重要, 不仅直接决定了控制律而且决定了控制系统的特征方程。最小方差的性能指标为

$$J = E\{y^2(k)\}, \quad (1)$$

$y(k)$ 为系统输出, 该自校正控制应用范围有限, 对非最小相位系统不能实现稳定控制。广义最小方差的自校正控制采用的性能指标为

$$J_1 = E\{y^2(k+m) + \mu u^2(k)\}, \quad (2)$$

其中 $u(k)$ 为系统输入, m 为系统滞迟, μ 为权因子。该控制将 $u(k)$ 为因素考虑了, 一般能应用于非最小相位系统, J_1 仅为简单形式, 写成一般则可用式(3)代表。

$$J_1 = E\{[P(z^{-1})y(k+m) - R(z^{-1})y_c(k+m)]^2 + [\lambda(z^{-1})u(k)]^2\}, \quad (3)$$

$P(z^{-1})$, $R(z^{-1})$, $\lambda(z^{-1})$ 均为权函数, $y_c(k+m)$ 是 $y(k+m)$ 的设定值 z^{-1} 为前移算子。权函数中系数也是由控制系统决定的, 一般而言, 权函数的确定是针对特定的被控对象离线而定的, 故式(3)形式上是固定不变的。事实上, 自校正控制的对象一般来讲是

时变且非稳的,为使控制性能得到提高须用可变形式的性能指标函数¹⁾。Lim 曾将式(3)中 $\lambda(z^{-1})$ 写成 $\lambda_0 \cdot \lambda'(z^{-1})$ 形式^[3]。其中 λ_0 根据系统不同的极点限制区域及变化着的系统动态特性可在线改变其数值,当然其它权函数中系数仍以固定形式出现。这种方式是针对系统的瞬态过程设计的。本文提出针对系统的稳态过程用的性能指标可变的自校正控制。

2 可变性能指标形式的自校正控制律

对单输入-单输出系统一般可以用

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-m}B(z^{-1})u(k) + C(z^{-1})e(k) + d, \quad (4)$$

表示。 $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 表示系统动力学特性多项式, $C(z^{-1})$ 代表系统干扰特性的多项式。 $e(k)$ 是白噪声序列, d 为恒值干扰。此时性能指标函数为¹⁾

$$J_2 = E\{[P(z^{-1})y(k+m) - R(z^{-1})y_c(k+m) + Q]^2 + [\lambda(z^{-1})U(k)]^2\} \quad (5)$$

与(3)式 J_1 相比有相似之处,但有质的不同,其中 $P(z^{-1})$ $\lambda(z^{-1})$ 均是 $n-1$ 阶的多项式

$$\begin{aligned} P(z^{-1}) &= 1 + p_1z^{-1} + \dots + p_{n-1}z^{-n+1} \\ \lambda(z^{-1}) &= \lambda_0 + \lambda_1z^{-1} + \dots + \lambda_{n-1}z^{-n+1} \end{aligned} \quad (6)$$

Q 是抗恒值干扰而设的。 J_1 中的 $P(z^{-1})$ 是 $m-1$ 阶的。当然主要不同在于 J_2 中的 $P(z^{-1})$, $\lambda(z^{-1})$ 等是在线可调的。一般系统总是以误差形式出现的,故不失一般性可令 $y_c(k+m)$ 为 0,下面来讨论控制律的形式。建立恒等式

$$P(z^{-1})C(z^{-1}) = A(z^{-1})D(z^{-1}) + z^{-m}E(z^{-1}), \quad (7)$$

这里

$$\begin{aligned} D(z^{-1}) &= 1 + d_1z^{-1} + \dots + d_{m-1}z^{-m+1}, \\ E(z^{-1}) &= 1 + e_1z^{-1} + \dots + e_{2n-2}z^{-2n+2}. \end{aligned} \quad (8)$$

将式(7)代入式(4),可得

$$\begin{aligned} P(z^{-1})y(k+m) &= \frac{E(z^{-1})}{C(z^{-1})}y(k) + \frac{B(z^{-1})D(z^{-1})}{C(z^{-1})} \cdot u(k) \\ &+ \frac{D(z^{-1})}{C(z^{-1})}d + D(z^{-1})e(k+m) \end{aligned} \quad (9)$$

再将式(9)代入 J_2 中,通过 $\frac{\partial J_2}{\partial u(k)} = 0$ 来求出最佳控制律式(10),

$$u(k) = \frac{D(z^{-1})d + E(z^{-1})y(k) + C(z^{-1})Q}{B(z^{-1})D(z^{-1}) + \lambda_0\lambda(z^{-1})C(z^{-1})/b_0} \quad (10)$$

实际上 $Q = \frac{R'(1)}{B(1)}d$, 而 $R'(z^{-1}) = \lambda_0\lambda(z^{-1})/b_0$, b_0 和 λ_0 分别为 $B(z^{-1})$, $\lambda(z^{-1})$ 的首系数。

这里 $u(k)$ 应该讲是最一般的形式了,它包涵了 J , J_1 , J_1' 等控制形式,若 $P(z^{-1}) = 1$, $\lambda(z^{-1}) = \sqrt{\mu}$ 则就成 J_1 的控制形式了。此时控制系统特征方程为:

$$1 + \frac{z^{-m}B(z^{-1})E(z^{-1})}{[B(z^{-1})D(z^{-1}) + \lambda_0\lambda(z^{-1})C(z^{-1})/b_0]A(z^{-1})} = 0,$$

1) 刘思行,自适应理论研究及在船舶操纵中应用,博士学位论文,上海交通大学 1991.11.

利用式 (7) 可以简化如下

$$P(z^{-1})B(z^{-1}) + \lambda_0 \lambda(z^{-1})A(z^{-1})/b_0 = 0 \quad (11)$$

此时特征方程的根是由 $P(z^{-1}), \lambda(z^{-1})$ 中 $2n - 1$ 个系数确定。下面研究如何在线调节这 $2n - 1$ 个权函数参数的问题。

一般而言,被控对象系统特征方程若为 l 阶,总可以写成下式,当然有 l 个根 $\alpha_k (k = 1, \dots, l)$

$$z^l + A_1 z^{l-1} + A_2 z^{l-2} + \dots + A_{l-1} z + A_l = 0$$

若将 p_i, λ_i 与 A_i 相对应的关系可用下式表示

$$A_k = \frac{\sum_{i=1}^k (b_i p_{k-i} + \lambda_0 \lambda_{k-i} \cdot a_i / b_0)}{b_0 + \frac{\lambda_0^2}{b_0}}$$

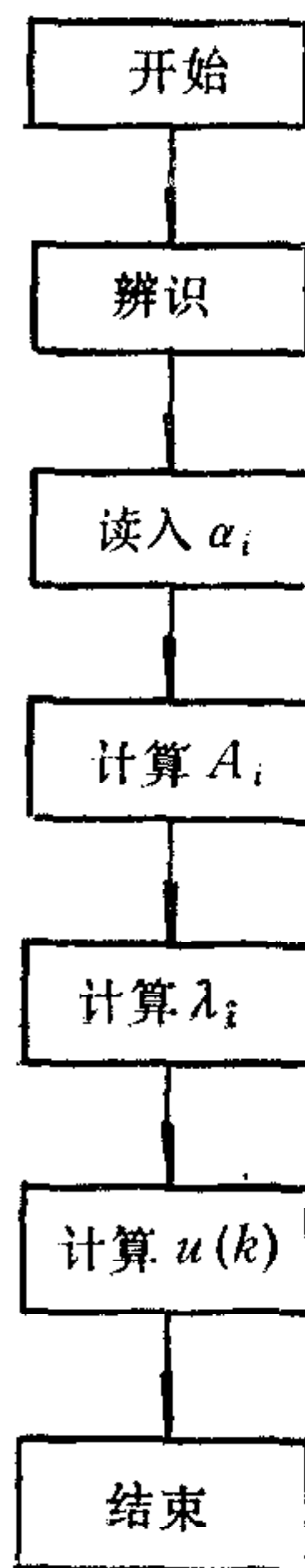


图 1

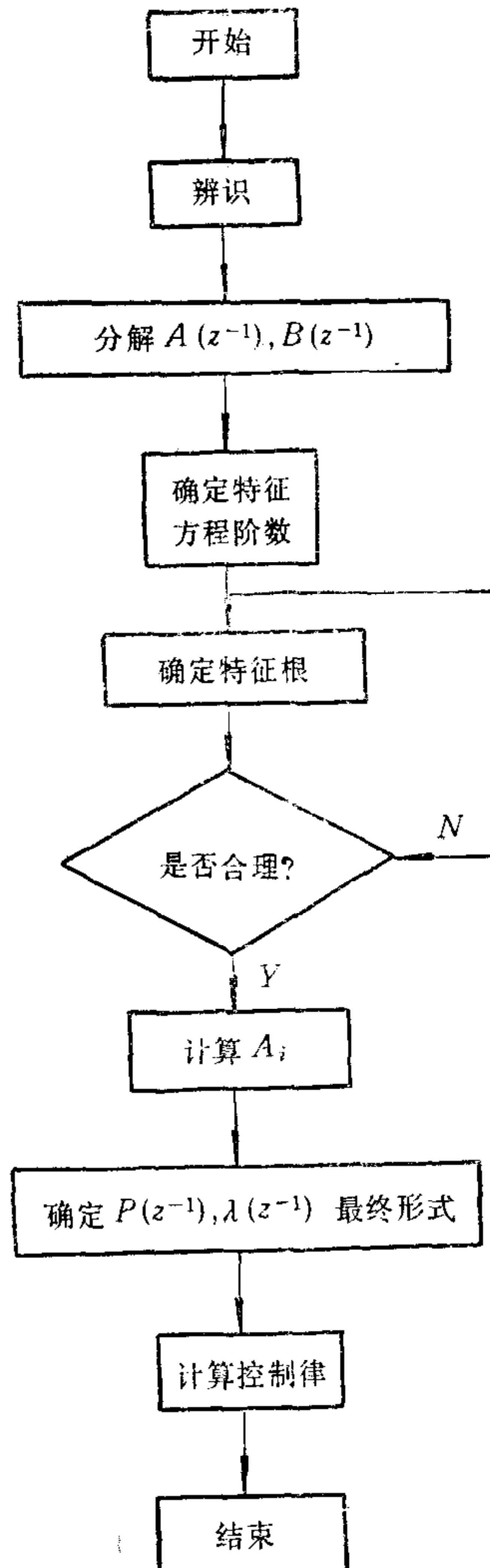


图 2

此时 $k = 1, \dots, 2n - 1$, 并且令 $p_0 = 1$ 和 $i \geq n$ 时 $a_i, b_i, \lambda_i, p_i = 0$. 另一方面 A_k 与方程的根 α_k 有关, 所以通过特征方程系数 A_k , 便可以将 α_k 与 p_i, λ_i 发生关系

$$(-1)^k \sum_{i=1}^{c_{2n-1}^k} \alpha_i \cdot \alpha_{i+1} \cdots \alpha_{i+k-1} = \frac{\sum_{i=1}^k (b_i \cdot p_{k-i} + \lambda_0 \lambda_{k-i} \cdot a_i / b_0)}{b_0 + \lambda_0^2 / b_0} \quad (12)$$

当 α_k 确定以后, 经辨识将 $A(z^{-1}), B(z^{-1})$ 等参数得到后, 由方程组(12)可在线确定 λ_i, p_i 的权函数参数. 控制程序流程此时如图 1 所示. 实际上对 J_2 而言, 通过不同形式的 $P(z^{-1}), \lambda(z^{-1})$ 的组合可应用于各不同的控制. 当然由于采用了上面的在线调节方法势必增加系统特征方程的阶数, 这对在线控制量的计算带来不利因素, 对此可以采用对算子多项式进行分解因式的办法来降阶, 限于篇幅不多讨论. 此时程序流程如图 2 所示.

3 仿真及实际应用

为了说明上述自校正控制性能, 这里以实船自适应操纵为例, 船名“大明山”号, 载重 35,000 吨, 是经济型散装货船. 1989 年, 笔者等基于性能指标 J_1 设计了一自适应操舵系统, 且成功地进行了海试^[4,5]. 现用上述自校正原理对其进行仿真, “大明山”轮航向保持运动差分方程为式(13)

$$y(k+1) + a_1 y(k) + a_2 y(k-1) + a_3 y(k-2) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + X \quad (13)$$

$y(k)$ 为航向误差, $u(k)$ 为舵角, 方程阶数为 3, $m = 1, X$ 代表干扰项, 如式(14)

$$X = G[e(k+1) + c_1 e(k) + c_2 e(k-1) + c_3 e(k-2)]I + d \quad (14)$$

$e(k)$ 为白噪声序列, G 是增益, d 为直流干扰, 当船速约 14 节且处于压载状态时(见作者博士论文).

$$a_1 = -2.328, a_2 = 1.705, a_3 = -0.3761, b_0 = 0.06243, b_1 = 0.00876, b_2 = -0.3503$$

这里的 J_2 中 $P(z^{-1})$ 取 1 (不如称 J_3), 下面对仿真结果作一简介, 仿真时

$$C(z^{-1}) = 1 + 0.5z^{-1} + 0.1z^{-2} - 0.3z^{-3}, \alpha_1 = 0.4, \alpha_2 = 0.7, \alpha_3 = 0.8^{[6]}$$

3.1 系统特征参数变化时的仿真

船本身的动态特性和所处的工作环境变化很大, 现以船速变化为例加以说明. 表 1 分别列出了方式 J_1 和方式 J_3 控制律情况下的航向偏差结果, 这里列了全速 V_0 及

表 1

	$s = 0.1$		$\alpha_1 = 0.4$		$\alpha_2 = 0.7$		$\alpha_3 = 0.8$	
	V_0		$\frac{3}{4} V_0$		$\frac{2}{3} V_0$		$\frac{1}{2} V_0$	
	方式 J_1	方式 J_3	方式 J_1	方式 J_3	方式 J_1	方式 J_3	方式 J_1	方式 J_3
E_y	-0.10380	-0.043091	-1.152	-0.309	-0.456	-0.134	-0.013	0.1215
D_y	3.22631	0.841698	8.39	1.92	11.76	1.895	19.27	3.89

$\frac{3}{4} V_0$, $\frac{1}{2} V_0$, $\frac{1}{4} V_0$ 等情况(见表 1)此处 Dy 指航向偏差方差, Ey 为均值, 显见 J_3 较好.

3.2 突发干扰情况下的仿真

此时有两种突发干扰. 一种是一般性, 对式(14)而言, 在 10 步长内 d 取 0.5, 此时一个步长为 10 秒. 在图 3 中 $x = 20$ 区域显示了这种情况, 曲线 A 代表 J_1 方式的航偏, B 则代表 J_3 . 可以看出方式 J_1 几乎发散, 但方式 J_3 则稳定. 另一种是强干扰, 即在一个步长内 d 取 5, 此时对应图 3 中 $x = 60$ 处, 同样方式 J_3 控制性能较好.

3.3 实船海试

在仿真和实际联调试验以后将上述控制系统安装在“大明山”散装船上进行实船海试. 试验时间是: 1990 年 3 月, 地点是厦门到汕头途中. 3 月 3 日 12:30 开始自适应操纵系统处于方式 J_3 , 结果显于表 2, 其中 Du 是舵角方差, Eu 是舵角均值. 从 14:50 开始方式 J_1 , 结果列于表 3. 相比之下很明显方式 J_3 比方式 J_1 要好.

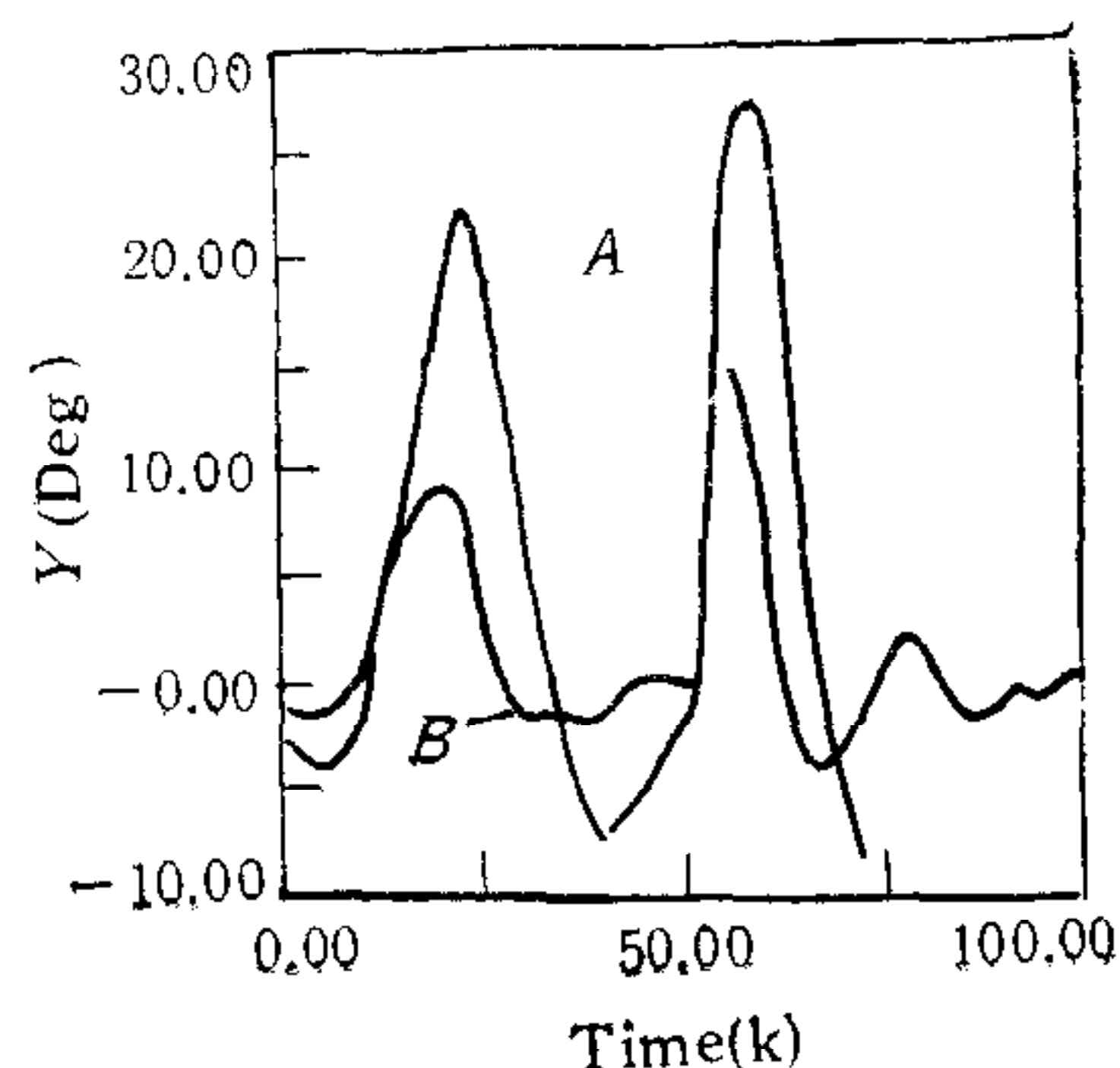


图 3

表 2

	$t = 12:40$	$t = 12:50$	$t = 13:00$	$t = 13:10$...
Ey	0.455	0.106	0.293	0.334	...
Dy	0.028	0.062	0.102	0.036	...
Eu	-0.747	-1.338	-0.505	-0.337	...
Du	0.758	0.915	1.507	1.372	...

表 3

	$t = 15:10$	$t = 15:30$	$t = 15:50$	$t = 16:10$...
Ey	0.276	0.172	0.058	0.227	...
Dy	0.283	0.447	0.923	0.209	...
Eu	-0.420	-0.236	0.109	-0.374	...
Du	2.843	3.883	8.089	2.113	...

4 小结

由仿真及试验表明具有可变性能指标的自校正自适应控制比通常的自校正控制具有更佳的性能. 因为该算法是以特征方程的特征根配置为基础的, 所以控制的稳定性能在线地得到保障. 对于自校正控制的问题虽然经过多年的研究, 但其控制的稳定性的确没有很好和很彻底解决过, 因而大大限制了自校正控制进一步的应用, 本文针对非稳和时变系统讨论的在线可调性能指标形式的自校正控制原理无疑有益的.

参 考 文 献

- [1] Harris. C. J & Billings. S. A, Self-tuning and adaptive control: Theory and applications. Peter peregrinus Ltd. England, 1981.
- [2] Warwick. K, Editorial self-tuning control. IEE Proceedings-D. **138** (1991), (1),1.
- [3] Hang. C. C, Lim. K. W & Ho. W. G, Generalised minimum variance stochastic self-tuning controller with pole restriction. IEE Proceedings-D. **138**(1991), (1), 25—32.
- [4] Zhang yanhua & Liu sixing, A kind of adaptive automatic steering system for ship. «中国造船»英文年刊, **6**(1991)132—141.
- [5] 刘思行,张炎华,张钟俊,自适应理论在船舶操纵中应用的研究. 上海交通大学学报, **26**(1992),(4),88—95.
- [6] 刘思行,张炎华,通过调节权因子的自校正自适应操纵系统. «中国造船» **116**(1992),(1),79—87.

RESEARCH ON A SELF-TUNER WITH CHANGEABLE PERFORMANCE DURING OPERATION

LIU SIXING

(Dept. of Precision Instruments, Tsinghua University 100084)

ZHANG YANHUA

(Dept. of Precision Instruments, Shanghai Jiao Tong University 200030)

ZHOU ZHAOYING

(Dept. of Precision Instruments, Tsinghua University 100084)

ABSTRACT

A generalized minimal variance stochastic self-tuning controller with a changeable control performance criterion is proposed in this paper. The law which determines the weighting transfer functions in every sample interval is solved through the pole-placement. This control algorithm is quite simple. Simulation results show that the strategy of variable weighting transfer functions is superior to the ordinary self-tuning controllers. Finally, the results of the full-scale test on a steamer steering are given.

Key words: generalized minimum-variance; pole-placement; self-tuning adaptive control.