

①
93, 16(5)
1-6

基于综合算法的自适应鲁棒控制*

The Adaptive Robust Control Based On Synthetical Algorithm

TP273.2

杨永臻
Yang Yongzhen

童俊
Ton Jun

(重庆大学电子工程信息学院, 重庆, 630044)

A

摘要 提出了一种基于综合算法的自适应鲁棒控制器。其主要特点是: 将广义最小方差控制和极点配置结合起来, 籍以提高控制器的鲁棒性。数字仿真证实了所提控制方案在控制效果上明显优于通常的自适应控制器。

关键词 自适应鲁棒控制; 专家系统; 参数估计; 广义最小方差; 极点配置

中国图书资料分类法分类号 TP273.3

自适应控制, 鲁棒性

ABSTRACT An adaptive robust control based on synthetical algorithm was presented in this paper. The main character is to put the expert knowledge into parameter identification to realize the robust estimation, and combine the generalised minimum variance control with the pole assignment control for improving the robustness of the controller. Numerical simulation has proved that the control scheme suggested by authors quite prevailed over the general adaptive controller in control effects.

KEYWORDS adaptive robust control; expert system; parameter estimation; generalised minimum variance; pole assignment

0 前言

基于双重效应和双重控制的随机自适应控制, 受到了人们的重视, 主因是其支柱理论是可以理解的, 在一定条件下的收敛性和稳定性得到了证明, 算法比较简单, 实时性好, 对一类被控对象呈现出有较好的设定值跟踪和抗扰性能。但是, 由于工业过程的非线性以及非模型化的高频动特性的存在, 严重地制约着一些实用算法的控制效果。为此, 自适应鲁棒控制一直是自动控制领域中的重点研究课题之一, 一种可行的鲁棒控制方案是建立一种由数字、定性及语言所描述的“结构式”模型, 以便利用全部有关被控过程的验前信息”。为此本文从控制理论的应用出发, 提出一种适用于具有时变不确定性动态系统的、基于综合算法的自适应鲁棒控制器。

* 收文日期 1993-02-09

** 专题讨论会报告, 对于控制的挑战——集体的观点, 美国国家基金会, IEEE 控制系统学会主办, 《控制与决策》编辑部译, 1987, 5.

1 鲁棒的参数估计器

随机自适应控制是一类以确定性等价原理为基础的、将在线参数估计与控制参数自整定相结合的双重效应技术。因此,实现鲁棒的闭环参数估计是至关重要的。通常,被控系统的持续激励是保证估计精度的先决条件,但当执行机构存在非线性,或当系统进入稳态时,持续激励的条件都将难以满足。特别是为了快速跟踪时变参数,而采取附加有按指数衰减渐消记忆的最小二乘参数估计法,同时系统存在未建模动特性时,甚至会出现严重的“喷发”现象,导致系统失稳。一种可能的方法是采用遗忘因子 λ 法^[1],自动调整 λ 的大小,但这种方法不能保证关键的协方差矩阵 $P(k)$ 有界,且其参数的选取比较困难,对系统先验知识的依赖性大。作者提出的鲁棒参数估计器,实质上是以递推最小二乘估计算法为基础的小型专家系统,主要目的是解决当系统受到非持续激励时所出现的“喷发”现象,以及快、慢参数变化时的跟踪等问题。特点是当遗忘因子 $\lambda(k) = 1$ 时,重新将其置为下限值 λ_0 ,使 $\lambda(k)$ 始终在 λ_0 到1之间变化,同时加入对 $P(k)$ 的迹的上下界限制。当 $\text{trace } P(k)$ 大于某一值时,向系统加入 m 序列伪随机码,而当 $\text{trace } P(k)$ 小于某一值时,则减小遗忘因子 λ 值,以使 $P(k)$ 增大,这就保证了 $\text{trace } P(k)$ 始终维持在适当的数值范围内,从而在避免发生“喷发”现象的前提下,有效地提高了参数估计的精度。

为了满足实时性的要求,所构造的专家系统不对透明性和通用性提出要求,这样就可为减小用户接口和知识库的规模。本文提出的知识库由以下产生式规则组成:

- | | |
|--|--|
| 1) IF $ e_2 > e_M$ | THEN $\lambda(k) = \beta_0$ |
| 2) IF $ Y(k) - Y(k-1) > Y_M$ | THEN $\lambda(k) = \beta_1$ |
| 3) IF $\text{trace } (P(k)) < P_L$ | THEN $\lambda(k) = \beta_2$ |
| 4) IF $ e_2 \leq e_M$ | THEN $\lambda(k) = g(k)$ |
| 5) IF $\lambda(k) = 1$ | THEN $\lambda_0 = \beta_3, \lambda(k) = \lambda_0$ |
| 6) IF $e_1 > \tau$ OR $e_1 < 0$ | THEN SR1 |
| 7) IF $\text{trace } (P(k)) > P_M$ | THEN SR1 |
| 8) IF $\text{trace } (P(k-1)) < 0$ and $\text{trace } (P(k)) < -P_1$ | THEN SR1 |
| 9) IF $U(k) \geq U_M$ | THEN $U(k) = U_M$ |
| 10) IF $U(k) \leq U_0$ | THEN $U(k) = U_0$ |

其中 $e_1 = 1 + \Phi^T(k-d)P(k)\Phi(k-d)$

$$e_2 = Y(k) - \Phi^T(k-d)\Theta(k-1)$$

U_M 为 $U(k)$ 的上限值; U_0 为 $U(k)$ 的下限值。

$e_M, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, Y_M, P_M, P_L, P_1, \tau$ 为贮存于数据库中的专家经验数据。

$g(k) = \lambda(k-1)(1 - \lambda_0) + \lambda_0$ 为经验公式。

SR1 为子规则:

- (a) IF $|U(k) - U(k-1)| < a$ and $U(k) > U_r$
THEN $U(k) = f_1(k)$
- (b) IF $|U(k) - U(k-1)| < a$ and $U(k) < U_{r1}$
THEN $U(k) = f_2(k)$

其中 a, U_p, U_{p1} 为贮存于数据库中的经验数据; $f_1(k), f_2(k)$ 为经验公式:

$$f_1(k) = U(k) + U_1; f_2(k) = U(k) + U_2.$$

U_1, U_2 为 m 序列伪随机码, 且 $U_1 > U_2$.

推理机构中的输入集为 $I = \{e_1, e_2, \lambda, P(k), Y, U\}$, 输出集为 $O = \{\lambda, U\}$, 映射关系为 $O = h(I)$. 知识库中的规则和数据库中的经验数据, 可以方便地通过键盘进行修改。

2 极点配置与广义最小方差相结合的控制策略

鲁棒分析表明, 基于常规控制策略的闭环极点配置自校正器, 对于具有未知时延或时延缓变的被控对象的控制鲁棒性较强, 能够稳定地控制非最小相位系统, 甚至是开环不稳定系统。而基于优化控制策略的广义最小方差自校正器, 在一定条件下, 适当选择有关的加权脉冲传递算子, 可使控制对过程的非线性、阶次失配和未建模动特性具有一定的鲁棒性^[2]。为此, 本文选用了这种综合控制策略, 作为研究工作的基础控制算法。控制律的推导简述如下:

设被控对象模型可由 ARMAX 模型表述为:

$$A(q^{-1})Y(k) = q^{-d}B(q^{-1})U(k) + C(q^{-1})\xi(k) \quad (1)$$

引入辅助系统 $\Phi(k+d)$

$$\Phi(k+d) = P(q^{-1})Y(k+d) - R(q^{-1})Y_r(k) + Q(q^{-1})U(k) \quad (2)$$

极小化指标函数

$$J = E\{\Phi(k+d)^2\} \quad (3)$$

可以求得控制律

$$U(k) = \frac{R(q^{-1})C(q^{-1})Y_r(k) - F(q^{-1})Y(k)}{C(q^{-1})Q(q^{-1}) + B(q^{-1})E(q^{-1})} \quad (4)$$

将(4)式代入(1)式得闭环输出方程为:

$$Y(k) = \frac{C(q^{-1})R(q^{-1})B(q^{-1})}{G(q^{-1})A(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1})F(q^{-1})}Y_r(k-d) + \frac{G(q^{-1})C(q^{-1})}{G(q^{-1})A(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1})F(q^{-1})}\xi(k) \quad (5)$$

其中

$$-q^{-d}B(q^{-1})F(q^{-1}) = B(q^{-1})A(q^{-1})E(q^{-1}) - P(q^{-1})C(q^{-1})B(q^{-1})$$

$$G(q^{-1})A(q^{-1}) = E(q^{-1})B(q^{-1})A(q^{-1}) + C(q^{-1})Q(q^{-1})A(q^{-1})$$

则(5)式可改写为:

$$Y(k) = \frac{B(q^{-1})R(q^{-1})}{P(q^{-1})B(q^{-1}) + Q(q^{-1})A(q^{-1})}Y_r(k-d) + \frac{G(q^{-1})}{P(q^{-1})B(q^{-1}) + Q(q^{-1})A(q^{-1})}\xi(k) \quad (6)$$

令

$$P(q^{-1})B(q^{-1}) + Q(q^{-1})A(q^{-1}) = T(q^{-1}) \quad (7)$$

(7)式为 Diophantine 方程, $T(q^{-1})$ 为希望的闭环极点。为了得到控制器参数, 必须在线递推求解上述 Diophantine 方程。为了使(7)式有解, 应满足下列阶次关系:

$$\deg T(q^{-1}) \leq \max\{\deg A(q^{-1}) + \deg Q(q^{-1}), [\deg B(q^{-1}) + \deg P(q^{-1}) - 1]\} \quad (8)$$

显然, 将综合算法再辅以专家知识, 就可以获得既有较好的控制鲁棒性, 又有极点配置的灵活性和最小方差渐近性的良好效果。最后得到的控制系统框图如图1所示。

3 仿真研究

以本文所提算法为基础,作者进行了大量的数字仿真试验,并在有、无随机噪声和有、无过程参数时变的情况下,与常规随机自适应控制方法进行了对比。仿真曲线证实了综合算法的有效性。限于篇幅,仅列出有代表性的三组数字仿真曲线。

仿真研究中采用的系统模型为:

$$(1 - 1.3005q^{-1} + 0.3256q^{-2})Y(k) = q^{-1}(0.03026 + 0.4464q^{-1} + 0.0069715q^{-2})U(k) + 20.36 \quad (9)$$

由于模型中含有直流分量 d , 控制律(4)式应改写为:

$$U(k) = \frac{R(q^{-1})C(q^{-1})Y_r(k) - F(q^{-1})Y(k) - E(1)d}{C(q^{-1})Q(q^{-1}) + B(q^{-1})E(q^{-1})} \quad (10)$$

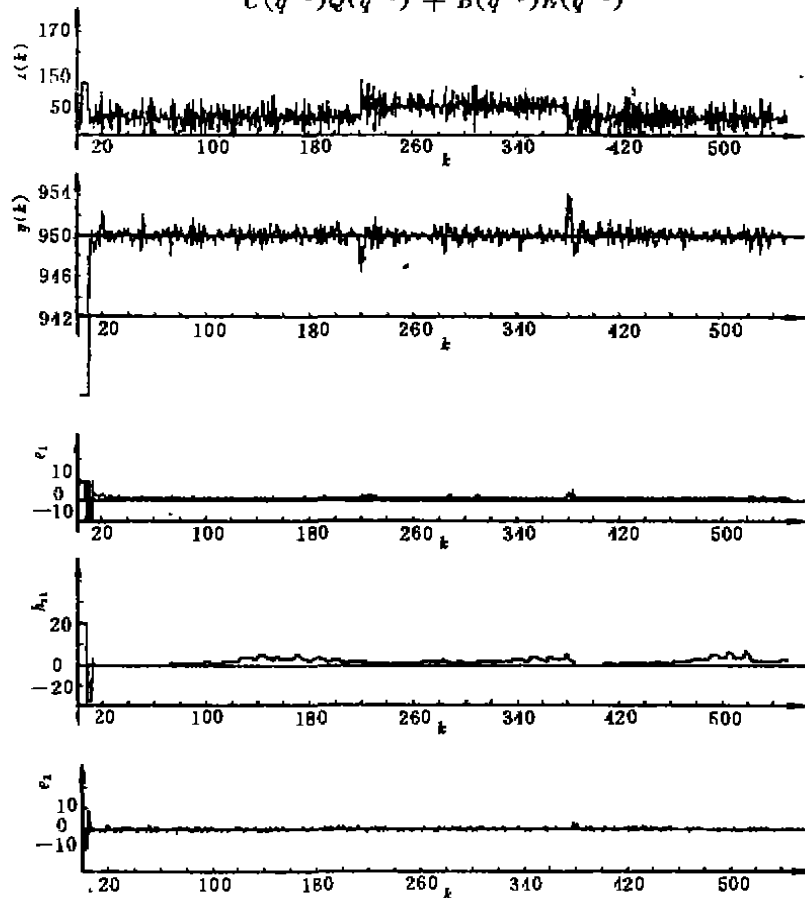


图2 参数 a_1 时变时的仿真曲线

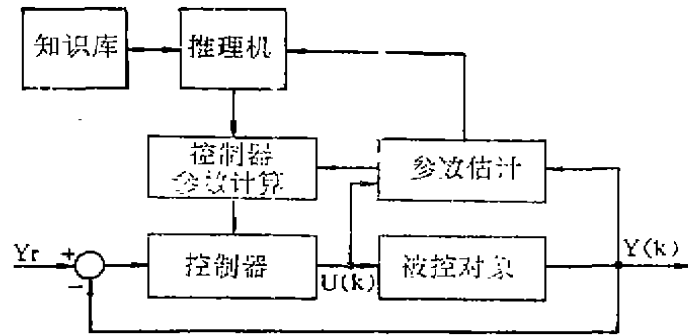


图1 综合型自适应鲁棒控制系统框图

仿真曲线中的坐标符号意义为：

$Y(k)$ 为系统输出, $U(k)$ 为控制量; $e_1 = 1 + \Phi^T(k-d)P(k)\Phi(k-d)$;

$e_2 = Y(k) + \Phi^T(k-d)\theta(k-1)$; $k \times 1 = \text{trace} |P(k)|$.

仿真过程中,所加的随机噪声方差为 $\sigma^2 = 0.4$.

图2是当过程参数 a_1 时变时的仿真曲线。在 $k = 220$ 时, a_1 由 -1.3005 改变为 -1.298 , 而在 $k = 380$ 时, a_1 又由 -1.298 改变为 -1.3005 . 可见系统对参数时变的承受能力较强。

图3是当过程参数 b_0 时变时的仿真曲线。在 $k = 220$ 时, b_0 由 0.03026 改变为 0.3026 , 而在 $k = 380$ 时, b_0 又由 0.3026 改变为 0.03026 . 曲线表明,当 b_0 变化较大时,系统仍有很强的承受能力。

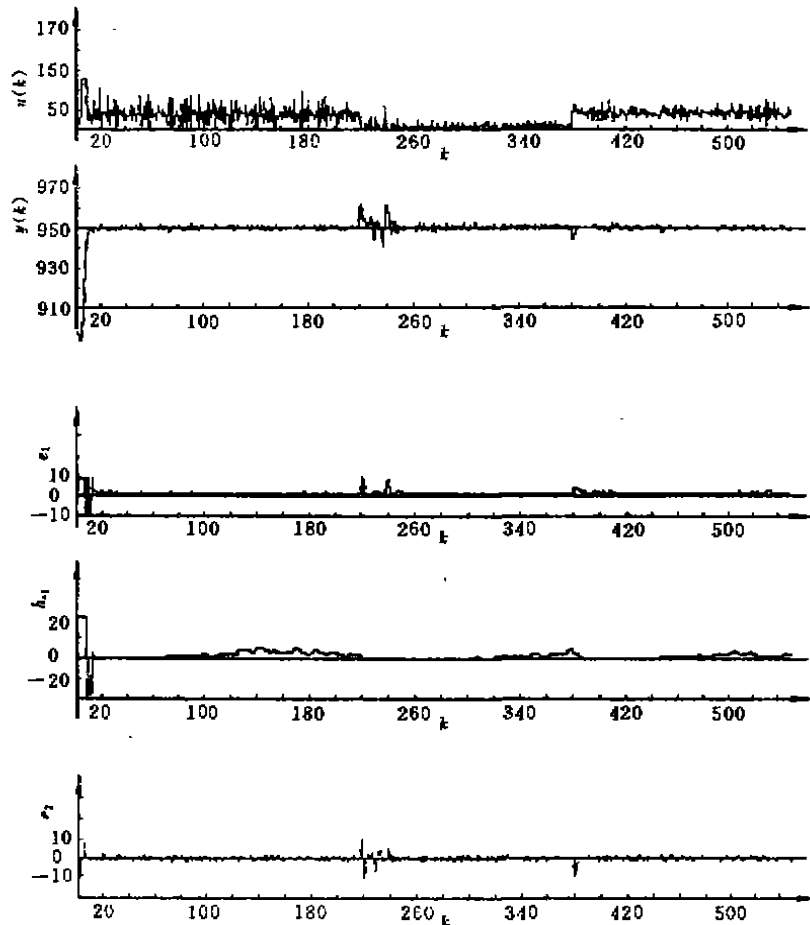


图3 参数 b_0 时变时的仿真曲线

图4为直流分量 d 变化时的仿真曲线。在 $k = 220$ 时, d 由 20.36 改变为 23.36 . 而在 $k = 380$ 时, d 又由 23.36 改变为 20.36 . 曲线表明,系统对 d 值变化的适应性很强。

总之,仿真研究证实了所提出的自适应鲁棒控制器,在控制性能上明显优于常规的自适应控制器.它既能克服参数估计时的“喷发”现象,又有较强的抗扰能力,对于失配的不确定性是鲁棒的.由于遗忘因子 λ 始终小于1,可在快速跟踪参数时变的情况下,不产生“数据饱和”现象。

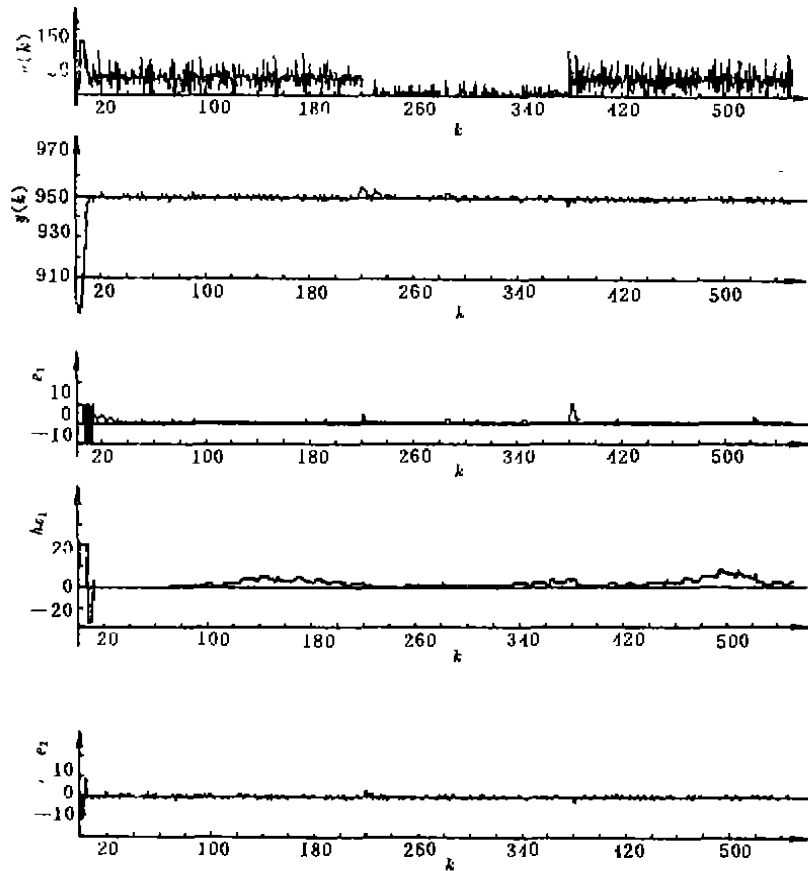


图 4 直流分量 δ 时变时的仿真曲线

4 结束语

八十年代期间,自适应控制在理论和应用方面都取得了进展,已经可以把对不确定性的建模与自适应估计和控制算法的收敛性质联系起来^[3],它和它的现代控制方法相比,在实际工程领域中获得较多的应用^[4]。尽管还有一系列的严重挑战问题,有待于深入研究解决,但可以认为,自适应控制在实现性能鲁棒性上是一种很有潜力的方法。基于上述信念,作者将专家系统技术应用于综合自适应算法中,寄希望于专家系统在知识表达上的多样性和灵活性,以求提高解决不确定性问题的能力。作者以初步的“结构式”模型为基础的研究表明,所提方案对于提高自适应控制系统的鲁棒性是行之有效的。

参 考 文 献

- 1 Fortescue T R, Kershenbaum L S, Ydrie B E. Implementation of self-tuning regulators with variable forgetting factors, Automatic, 1981, 17(6)
- 2 Gawthrop P J, Lim K W. Robustness of Self-tuning Controllers, IEE proc., 1982, 129, pt. D(1)
- 3 goodwin G C, Sin K S. Adaptive Filtering, prediction and Control, Prentice Hall, 1984
- 4 Astrom K J, Wittenmark B. Adaptive Control, Addison-Wesley Publishing Company, 1989