

改进的电弧弧长自适应T-S模糊观测器

高哲, 廖晓钟, 沙德尚

(北京理工大学自动化学院, 北京 100081; 北京理工大学复杂系统智能控制与决策教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 通常基于Lyapunov方法设计自适应观测器时, 要求系统满足Kalman-Yakubovitch-Popov(KYP)定理的约束. 因此, 通过增加辅助变量放宽了约束条件, 对未知参数的一类非线性系统, 提出了一种模糊自适应观测器, 用来观测熔化极气体保护焊的弧长. 在焊枪到工件的距离未知的情况下, 可以有效地获得弧长变化信息. 仿真结果验证了该方法的有效性.

关键词: 模糊系统; 自适应观测器; 弧长观测; 熔化极气体保护焊

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

An improved adaptive T-S fuzzy observer for arc length observing

GAO Zhe, LIAO Xiao-zhong, SHA De-shang

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
Key Laboratory of Complex system Intelligent Control and Decision, Ministry of Education,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The design of the adaptive observer based on the Lyapunov method commonly requires that the system satisfies constraints of Kalman-Yakubovitch-Popov(KYP) theorem. Therefore, by adding an auxiliary variable to relax this constraint, this paper presents an improved adaptive observer for nonlinear systems with unknown parameters. This method is applied to design an observer for the arc length in a gas-metal arc welding system. The arc length is effectively estimated on condition that the distance between the welding tip to the work piece is unknown. Simulation results show the effectiveness of this approach.

Key words: fuzzy systems; adaptive observer; arc length observing; gas metal arc welding

1 引言(Introduction)

由于焊接效率高, 焊接效果好, 熔化极气体保护焊(gas metal arc welding, GMAW)已经成为主要的焊接方式, 在很多工业场合得到了广泛的应用. 脉冲式GMAW焊接方式具有方向可控性强、平均电流小等优点, 适用于精密器件和铝金属等需要大电流(大于600 A)的焊接场合. 在GMAW系统中, 保持电弧弧长的稳定可以获得更好的焊接效果. 但是在实际的焊接过程中, 弧长是不可以直接测量的, 所以本文设计一种非线性观测器来获得GMAW系统的弧长信息.

通过T-S模糊模型的处理方法, 非线性系统可以转化为一组线性系统, 可将原来线性系统的设计方法应用到非线性系统中^[1]. 文献[2~4]设计了基于观测器的鲁棒并联补偿控制器. 根据前件变量是否完全可以观测, 观测器分为两大类^[5], 即前件变量完全可测与不完全可测. 文献[6]设计的观测器讨论了参数已知的情况下, 前件变量含有不可测的状态的观测器设计问题. 但是对于GMAW系统的弧长

观测器设计来说, 它的T-S模糊模型的前件变量仅仅与输出有关, 属于第一种情况. Lyapunov方法是针对非线性系统设计自适应观测器的主要方法之一. 文献[7]针对某些系统矩阵参数未知的T-S模糊系统设计了一类基于Lyapunov方法的观测器. 因为系统状态不能完全可测, 在自适应律中不能直接使用状态误差, 但是如果未知参数前的矩阵可以分解为一个与输出矩阵转置的维数相同的矩阵, 那么状态误差可以通过Kalman-Yakubovitch-Popov(KYP)定理, 转化为输出误差的形式^[8,9]. 但是对于GMAW系统来说, 它的T-S模糊模型并不满足这个条件. 同时, 针对一类时变系统, 文献[10, 11]利用添加辅助变量的方法, 设计一类时变系统的自适应观测器.

本文将含有未知参数的非线性系统转化为T-S模糊系统, 通过添加辅助变量的方法, 将针对线性时变系统的观测器设计方法推广到非线性系统中, 不需要系统满足KYP定理所需的条件, 最后将设计的观测器应用到GMAW系统的弧长观测中, 实现对弧长的有效观测.

2 问题描述(Problem statement)

考虑如下的非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)\theta + Bu, \\ y = Cx, \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^p$, $\theta \in \mathbb{R}$, $y \in \mathbb{R}$ 分别是非线性系统(1)的状态、控制输入、未知参数和系统的输出, $B \in \mathbb{R}^{n \times p}$ 为控制矩阵, $C \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ 为输出矩阵, $f(x) \in \mathbb{R}^n$, $g(x) \in \mathbb{R}^n$ 为是状态 x 的非线性函数. 根据文献[12]的方法, 系统(1)在状态 x 的取值范围内, 可以描述为如下的非线性T-S模糊模型.

If ξ_1 is F_1^i and ξ_2 is $F_2^i \cdots \xi_p$ is F_p^i , Then

$$\begin{cases} \dot{x} = A_{i1}x + A_{i2}\theta + Bu, \\ y = Cx, \end{cases} \quad (2)$$

其中: ξ_j 为前件变量, F_j^i 为第 i 条模糊规则第 j 个变量的模糊集, 对应的隶属度函数为 $\sigma_j^i(\xi_j)$, $i = 1, 2, \dots, r$, r 为模糊规则数, $j = 1, 2, \dots, p$, p 为前件变量数, $A_{i1} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和 $A_{i2} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 是第 i 个子系统的系统矩阵. 这种非线性处理方法, 将非线性部分转移到隶属函数中, 使得每个子系统中不再含有非线性项. 通过乘积推理, 重心加权的方法, 得到式(2)的反模糊化的系统模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(y)(A_{i1}x + A_{i2}\theta) + Bu}{\sum_{i=1}^r w_i(y)}, \\ y = Cx, \end{cases} \quad (3)$$

其中: $w_i(y) = \sigma_1^i(y)\sigma_2^i(y)\cdots\sigma_p^i(y)$ 是第 i 条规则的模糊隶属函数, 这里假设前件变量仅仅与输出 y 有关. 定义 $h_i(y) = w_i(y) / \sum_{i=1}^r w_i(y)$, 则式(3)可以改写为

$$\begin{cases} \dot{x} = \sum_{i=1}^r h_i(y)(A_{i1}x + A_{i2}\theta) + Bu, \\ y = Cx, \end{cases} \quad (4)$$

并且有 $\sum_{i=1}^r h_i(y) = 1$, $h_i(y) \geq 0$. 针对系统(4), 设计如下的模糊观测器:

$$\dot{\hat{x}} = \sum_{i=1}^r h_i(y)(A_{i1}\hat{x} + A_{i2}\hat{\theta}) + Bu + G(y - C\hat{x}). \quad (5)$$

定义误差 $e = \hat{x} - x$ 和 $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$, 并假设未知参数 θ 是一个常值, 那么有 $\dot{\tilde{\theta}} = \dot{\hat{\theta}}$ 和

$$\dot{e} = \sum_{i=1}^r h_i(y)[(A_{i1} - GC)e + A_{i2}\tilde{\theta}]. \quad (6)$$

如果定义如下的Lyapunov函数:

$$V = e^T P e + \frac{\tilde{\theta}^2}{\gamma}, \quad (7)$$

其中: P 为一个正定矩阵, $\gamma > 0$, 则

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} + \frac{2\tilde{\theta}\dot{\tilde{\theta}}}{\gamma} = \\ & \left\{ \sum_{i=1}^r h_i(y)[(A_{i1} - GC)e + A_{i2}\tilde{\theta}] \right\}^T P e + \\ & e^T P \left\{ \sum_{i=1}^r h_i(y)[(A_{i1} - GC)e + A_{i2}\tilde{\theta}] \right\} + \frac{2\tilde{\theta}\dot{\tilde{\theta}}}{\gamma} = \\ & \sum_{i=1}^r h_i(y) \{ e^T [(A_{i1} - GC)^T P + P(A_{i1} - GC)] e \} + \\ & \sum_{i=1}^r h_i(y) 2e^T P A_{i2} \tilde{\theta} + \frac{2\tilde{\theta}\dot{\tilde{\theta}}}{\gamma}. \end{aligned}$$

如果要求 $\dot{V} < 0$, 这要求每个子系统满足

$$(A_{i1} - GC)^T P + P(A_{i1} - GC) = -Q_i, \quad (8)$$

$$P A_{i2} = C^T d_i, \quad (9)$$

其中 Q_i 为一个正定矩阵, 即要求每个子系统的传递函数都是正实函数, 满足KYP定理的条件. 如果满足式(8)(9), 那么自适应律为

$$\dot{\tilde{\theta}} = \gamma \sum_{i=1}^r h_i(y) y d_i, \quad (10)$$

那么有 $\dot{V} = - \sum_{i=1}^r h_i(y) e^T Q_i e < 0$. 但是, 如果要求每个子系统未知参数前的矩阵 A_{i2} 都满足式(9)是非常苛刻的, 也是非常有限性的, 尤其是对于T-S模糊系统, 要求每一个子系统都是满足KYP定理的约束条件. 所以本文在下边小节中, 将设计一种基于辅助变量的方法设计T-S模糊系统的观测器, 并不要求每个子系统参数都满足式(8)(9)的约束条件.

3 含未知参数的T-S模糊模型的自适应观测器设计(Design of adaptive observer for T-S fuzzy systems with unknown parameter)

从系统(4)中可以看出, 未知参数 θ 也可以看成系统的另一个输入信号, 系统状态 x 的运动轨迹可以看成是输入信号 u 和未知参数 θ 一起驱动的. 所以将系统状态 x 分解为 $x = x_u + x_\theta$, 其中: $x_u \in \mathbb{R}^n$ 看成是与控制信号 u 有关的状态, $x_\theta \in \mathbb{R}^n$ 是与未知参数 θ 有关的状态. 系统(4)的状态方程可以分解为如下的两个子部分, 即

$$\dot{x}_u = \sum_{i=1}^r h_i(y) A_{i1} x_u + Bu, \quad (11)$$

$$\dot{x}_\theta = \sum_{i=1}^r h_i(y) (A_{i1} x_\theta + A_{i2} \theta). \quad (12)$$

针对式(11)(12)分别设计如下的模糊观测器:

$$\dot{\hat{x}}_u = \sum_{i=1}^r h_i(y) A_{i1} \hat{x}_u + Bu + G(y - C\hat{x}_u), \quad (13)$$

$$\dot{\hat{x}}_\theta = \sum_{i=1}^r h_i(y) (A_{i1} \hat{x}_\theta + A_{i2} \hat{\theta}) + w - GC\hat{x}_\theta, \quad (14)$$

其中: $G \in \mathbb{R}^n$ 是需要设计的向量; $\hat{x}_u, \hat{x}_\theta$ 和 $\hat{\theta}$ 分别是 x_u, x_θ 和 θ 的估计值, $w \in \mathbb{R}^n$ 是辅助向量用来补偿观测误差.

假设存在一个时变的向量 $f(t) \in \mathbb{R}^n$, 使得 $\dot{\hat{x}}_\theta = f(t)\hat{\theta}$, 则式(14)变为

$$f(t)\hat{\theta} + \dot{f}(t)\hat{\theta} = \sum_{i=1}^r h_i(y)(A_{i1}f(t)\hat{\theta} + A_{i2}\hat{\theta}) + w - GCf(t)\hat{\theta}. \quad (15)$$

令 $w = f(t)\hat{\theta}$, 则

$$\dot{f}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(y)[(A_{i1} - GC)f(t) + A_{i2}]. \quad (16)$$

合并式(13)(14), 可以得到系统(4)的观测器如下:

$$\dot{\hat{x}} = \sum_{i=1}^r h_i(y)(A_{i1}\hat{x} + A_{i2}\hat{\theta}) + Bu + G(y - C\hat{x}) + w. \quad (17)$$

定理 1 假设 u 是一个持续激励信号, 如果存在正数 λ 和满足 $A_{i1} - GC < 0$ ($i = 1, 2, \dots, r$) 的向量 G , 那么设计如下的观测器, 则观测误差 $e = \hat{x} - x$ 和参数估计误差 $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ 渐近趋于零.

$$\dot{\hat{x}} = \sum_{i=1}^r h_i(y)(A_{i1}\hat{x} + A_{i2}\hat{\theta}) + Bu + (G + f(t)\lambda f(t)^T C^T)(y - C\hat{x}), \quad (18)$$

其中自适应律为

$$\dot{\hat{\theta}} = \lambda f(t)^T C^T (y - C\hat{x}), \quad (19)$$

$$\dot{f}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(y)[(A_{i1} - GC)f(t) + A_{i2}]. \quad (20)$$

证 将式(19)(20)代入式(18)中, 可得

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= \sum_{i=1}^r h_i(y)(A_{i1}\hat{x} + A_{i2}\hat{\theta}) + Bu + G(y - C\hat{x}) + f(t)\dot{\hat{\theta}} = \\ & \sum_{i=1}^r h_i(y)(A_{i1}\hat{x} + A_{i2}\hat{\theta}) + Bu + G(y - C\hat{x}) + w, \end{aligned}$$

所以定理1中的观测器与式(17)是等价的.

假设 $\dot{\theta} = 0$, 那么根据 $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$, 有 $\dot{\tilde{\theta}} = \dot{\hat{\theta}}$. 根据式(4)(17), 有

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{\hat{x}} - \dot{x} = \sum_{i=1}^r h_i(y)(A_{i1}\hat{x} + A_{i2}\hat{\theta}) + G(y - C\hat{x}) + w - \sum_{i=1}^r h_i(y)(A_{i1}x + A_{i2}\theta) = \\ & \sum_{i=1}^r h_i(y)(A_{i1} - GC)e + \sum_{i=1}^r h_i(y)A_{i2}\tilde{\theta} + f(t)\dot{\tilde{\theta}}. \end{aligned} \quad (21)$$

定义辅助变量 $\eta = e - f(t)\tilde{\theta}$, 并对其求导. 考虑

式(20)可得

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= \dot{e} - \dot{f}(t)\tilde{\theta} - f(t)\dot{\tilde{\theta}} = \sum_{i=1}^r h_i(y)(A_{i1} - GC)e + \sum_{i=1}^r h_i(y)A_{i2}\tilde{\theta} - \dot{f}(t)\tilde{\theta} = \\ & \sum_{i=1}^r h_i(y)(A_{i1} - GC)e + \sum_{i=1}^r h_i(y)A_{i2}\tilde{\theta} - \sum_{i=1}^r h_i(y)[(A_{i1} - GC)f(t) + A_{i2}]\tilde{\theta} = \\ & \sum_{i=1}^r h_i(y)(A_{i1} - GC)[e - f(t)\tilde{\theta}] = \sum_{i=1}^r h_i(y)(A_{i1} - GC)\eta. \end{aligned} \quad (22)$$

在定理1的假设条件下, η 渐近趋于零. 对 $\tilde{\theta}$ 求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\theta}} &= \lambda f^T(t)C^T e = -\lambda f^T(t)C^T C(\eta + f(t)\tilde{\theta}) = \\ & -\lambda f^T(t)C^T C f(t)\tilde{\theta} - \lambda f^T(t)C^T C \eta. \end{aligned} \quad (23)$$

如果控制输入 u 是一个持续激励信号, 那么系统(4)的状态是持续变化的. 因为 $h_i(y) \geq 0$, 如果 $A_{i1} - GC < 0$, 那么系统(22)是可观测的, 根据时变系统的可观性, 存在正数 α, β, T 满足

$$\alpha \leq \int_t^{t+T} f(\tau)^T C^T C f(\tau) d\tau \leq \beta. \quad (24)$$

引理 1 假设 $\varphi(t) \in \mathbb{R}^{m \times p}$ 为有界分段连续矩阵, $\Gamma \in \mathbb{R}^{p \times p}$ 为任意对称正定矩阵, 存在常数 α, β, T 满足

$$\alpha \leq \int_t^{t+T} \varphi(\tau)^T \varphi(\tau) d\tau \leq \beta, \quad (25)$$

则系统 $\dot{x} = -\Gamma \varphi(\tau)^T \varphi(\tau) x$ 是全局渐近稳定的^[13].

因为式(23)的齐次部分是 $f^T(t)C^T C f(t)$ 且 η 渐近稳定. 根据引理1, $\dot{\tilde{\theta}} = -f^T(t)C^T C f(t)\tilde{\theta}$ 是渐近稳定的. 因此, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 辅助变量 $\eta \rightarrow 0$, 故估计误差 $\tilde{\theta} \rightarrow 0, e \rightarrow 0$.

4 GMAW系统弧长观测仿真(Simulations of arc length observing in GMAW System)

在不考虑融滴尺寸大小的情况下, GMAW系统的数学模型可以用弧长平衡关系和电压平衡关系表示^[14, 15], 系统的状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{C_1 x_2 + C_2 \rho x_2^2 (CT - x_1)}{\pi r_w^2} - v_m, \\ \dot{x}_2 = \frac{u - [R_a + R_s + \rho(CT - x_1)]x_2}{L_s} - \frac{U_0 - E_a x_1}{L_s}, \end{cases} \quad (26)$$

其中: x_1 和 x_2 分别表示弧长和焊接电流, C_1 和 C_2 是与焊接材料尺寸以及以及保护气体有关的常数, ρ 是

单位长度的电阻值, v_m 是送丝速度, u 是电源电压, CT 是焊枪到工件的距离, U_0 是电弧电压常数, E_a 是电弧电场强度, R_a 是电弧电阻, R_s 和 L_s 表示电源的电感和电阻.

因为电流 x_2 是可测的, 所以选择 x_2 作为GMAW系统的输出 y , 那么根据 x_2 的最大最小值, 可以获得GMAW系统的T-S模糊模型.

令 x_2 满足 $m \leq x_2 \leq M$, 且 $n \leq x_2^2 \leq N$, 并假设未知参数 $\theta = CT$, 那么T-S模糊模型如下:

If x_2 is M and x_2^2 is N , Then

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 N & a_1 \\ a_2 + c_2 M & a_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 N \\ d_2 M \end{bmatrix} \theta + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix};$$

If x_2 is M and x_2^2 is n , Then

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 n & a_1 \\ a_2 + c_2 M & a_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 n \\ d_2 M \end{bmatrix} \theta + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix};$$

If x_2 is m and x_2^2 is N , Then

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 N & a_1 \\ a_2 + c_2 m & a_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 N \\ d_2 m \end{bmatrix} \theta + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix};$$

If x_2 is m and x_2^2 is n , Then

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 n & a_1 \\ a_2 + c_2 m & a_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 n \\ d_2 m \end{bmatrix} \theta + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}.$$

其中:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{C_1}{\pi r_w^2}, \quad a_2 = -\frac{E_a}{L_s}, \\ c_1 &= -\frac{C_2 \rho}{\pi r_w^2}, \quad c_2 = \frac{\rho}{L_s}, \\ d_1 &= \frac{C_2 \rho}{\pi r_w^2}, \quad d_2 = \frac{\rho}{L_s}, \quad b = \frac{1}{L_s}, \\ e_1 &= -v_m, \quad e_2 = -\frac{U_0}{L_s}. \end{aligned}$$

第1~4条模糊规则的隶属度函数分别如下:

$$\begin{aligned} w_1(y) &= \frac{y-m}{M-m} \frac{y^2-n}{N-n}, \\ w_2(y) &= \frac{y-m}{M-m} \frac{N-y^2}{N-n}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_3(y) &= \frac{y-m}{M-m} \frac{N-y^2}{N-n}, \\ w_4(y) &= \frac{M-y}{M-m} \frac{N-y^2}{N-n}. \end{aligned}$$

具体的参数设置为:

$$\begin{aligned} C_1 &= 2.8855 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{A}, \\ C_2 &= 5.22 \times 10^{-10} \text{ m}^3/(\text{A}^2\Omega), \\ E_a &= 1500 \text{ V/m}, \quad U_0 = 15.7 \text{ V}, \\ R_a &= 0.022 \Omega, \quad R_s = 0.001 \Omega, \\ L_s &= 0.35 \times 10^{-6} \text{ h}, \quad \rho = 0.2821 \Omega/\text{m}, \\ r_w &= 0.001 \text{ m}, \quad v_m = 0.1 \text{ m/s}. \end{aligned}$$

因为脉冲式GMAW焊接系统的控制电压是一系列脉冲形式的信号, 满足控制信号是持续信号的条件. 可以将上一节设计的观测器应用到GMAW系统的弧长观测中. 令

$$\begin{aligned} x(0) &= [0.002 \ 0]^T, \quad N = M^2, \\ M &= 700, \quad n = 0, \quad m = 0. \end{aligned}$$

通过计算, 发现所有的子系统的 A_{i1} 的特征值都有负实部, 为了简便起见, 设

$$G = [0, 0]^T, \quad \lambda = 10.$$

仿真结果如图1~4所示.

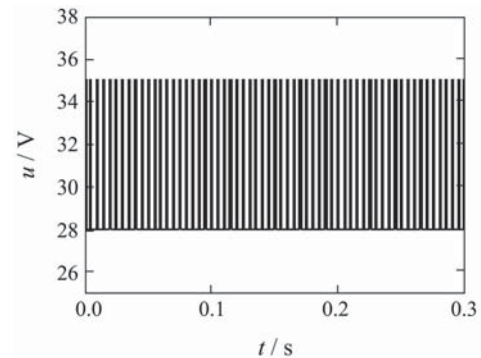


图1 输入电压 u

Fig. 1 Input voltage u

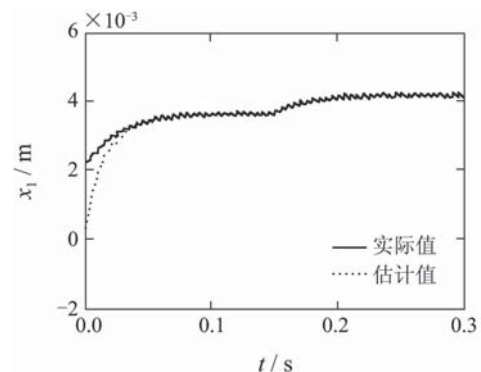


图2 弧长 x_2 及其观测值

Fig. 2 Arc length x_2 and its estimation

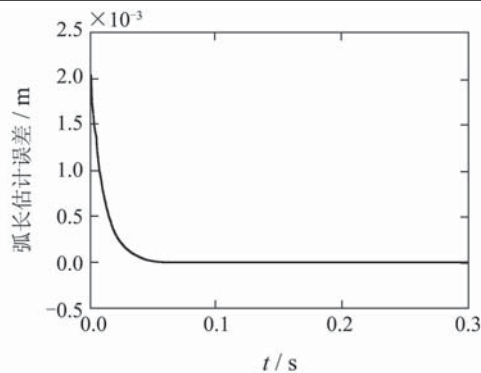


图 3 弧长估计误差

Fig. 3 Estimation error of the arc length

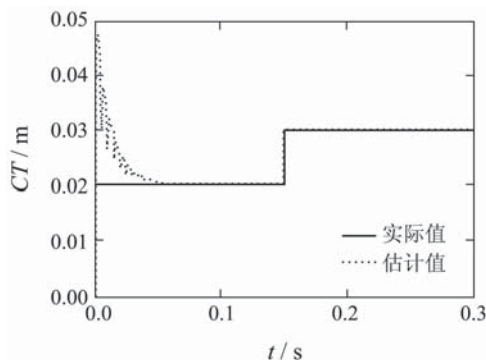
图 4 未知参数 CT 及其估计值Fig. 4 Unknown parameter CT and its estimation

图1给出了GMAW系统的持续脉冲形式的输入信号。图2和图3描述了弧长实际值和估计值的响应以及误差,可知在0.05 s时估计值可以收敛于实际值,收敛速度快。图4给出了未知参数 CT 的实际值和估计值的响应曲线。可以看出所设计观测器可以实现对弧长和未知参数进行有效的估计和观测。在0.15 s时,参数发生了变化,但是设计的观测器仍然可以快速地获得未知参数,实现对弧长有效的观测。

5 结论(Conclusions)

本文针对含有未知参数的非线性系统设计了一类自适应模糊观测器,通过T-S模糊模型的处理方法,将非线性系统转化为一组线性系统的组合。根据控制输入和未知参数的作用分解系统的状态,通过添加辅助变量的方法,设计了一类不需要满足KYP定理的自适应模糊观测器。通过设计向量 G 和正数 λ 可以控制观测误差和参数估计误差的收敛速度。将这种观测器的设计方法应用到GMAW系统的电弧弧长的观测中。通过仿真可知,当未知参数 CT 发生时,仍然可以快速有效地获得弧长变化信息。

参考文献(References):

[1] TAKAGI T, SUGENO M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J]. *IEEE Transactions on Systems,*

Man and Cybernetics, 1985, 15(1): 116 – 132.

- [2] NGUANG S K, SHI P. Fuzzy output feedback control design for nonlinear systems: An LMI approach[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2003, 11(3): 331 – 340.
- [3] TONG S C, LI H H. Observer-based robust fuzzy control of nonlinear systems with parametric uncertainties[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, 131(2): 165 – 184.
- [4] 齐丽, 杨俊友. 基于观测器的不确定T-S模糊系统的鲁棒镇定[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(5): 627–630.
(QI Li, YANG Junyou. Observer-based robust stabilization of uncertain T-S fuzzy systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(5): 627 – 630.)
- [5] YONEYAMA J. H_∞ filtering for fuzzy systems with immeasurable premise variable: An uncertain system approach [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2009, 160(12): 1738 – 1748.
- [6] YONEYAMA J. H_∞ output feedback control for fuzzy systems with immeasurable premise variables: Discrete-time case[J]. *Applied Soft Computing*, 2008, 8(2): 949 – 958.
- [7] PARK C W, CHO Y W. T-S model based indirect adaptive fuzzy control using online parameter estimation[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B, Cybernetics*, 2004, 34(6): 2293 – 2302.
- [8] MARINO R, SANTOSUOSSO G L, TOMEI P. Robust adaptive observers for nonlinear systems with bounded disturbances[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, 45(6): 967 – 972.
- [9] JONGCHUL J, KUNSOO H, FATHY H K, et al. Optimal robust adaptive observer design for a class of nonlinear systems via an approach[C] // *Proceedings of the American Control Conference*. New York: IEEE, 2006: 3637 – 3642.
- [10] ZHANG Q H. Adaptive observer for multiple-input-multiple-output (MIMO) linear time-varying systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 47(3): 525 – 529.
- [11] XU A P, ZHANG Q H. Nonlinear system fault diagnosis based on adaptive estimation[J]. *Automatica*, 2004, 40(7): 1181 – 1193.
- [12] TANAKA K, WANG H O. *Fuzzy Control Systems Design and Analysis: a Linear Matrix Inequality Approach*[M]. New York: Wiley, 2001.
- [13] ANDERSON B D, BITMEAD R R, JOHNSON C R, et al. *Stability of Adaptive Systems: Passivity and Averaging Analysis*[M]. Cambridge: MIT Press, 1986.
- [14] ABDELRAHMAN M. Feedback linearization control of current and arc length in GMAW systems[C] // *Proceedings of the American Control Conference*. New York: IEEE, 1998: 1757 – 1761.
- [15] THOMSEN J S. Feedback linearization based arc length control for gas metal arc welding [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. New York: IEEE, 2005: 3568 – 3573.

作者简介:

高哲 (1983—), 男, 博士研究生, 目前主要研究方向为非线性控制、模糊控制, E-mail: gaozhe2@yahoo.cn;

廖晓钟 (1962—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 目前主要研究方向为智能控制、运动控制、能源变换控制, E-mail: liaoxiaozhong@bit.edu.cn;

沙德尚 (1977—), 男, 博士, 硕士生导师, 目前主要研究方向为电力电子高频变换、全数字化焊接电源, E-mail: shadeshang@bit.edu.cn.