

文章编号: 1001-0920(2011)03-0387-06

不可测前件变量模糊 H_∞ 观测器及其在 GMAW 系统的应用

高 哲, 廖晓钟, 沙德尚

(北京理工大学 自动化学院, 北京 100081)

摘 要: 基于前件变量未知的 T-S 模糊系统设计一类模糊观测器. 将模糊系统转化为广义系统的形式, 提出一种广义系统的观测器设计方法, 消除了控制输入对观测误差方程的影响. 针对测量端含有扰动的模糊系统, 通过拉格朗日中值定理, 将模糊观测器转化为一组线性矩阵不等式的求解问题, 并将这种观测器的设计方法应用到熔化极气体保护焊系统, 快速有效地实现了对弧长的观测. 最后通过仿真分析验证了所提出的观测器设计方法的有效性.

关键词: T-S 模糊系统; 模糊观测器; 弧长观测; 广义系统

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Fuzzy H_∞ observer design for GMAW system with immeasurable premise variable

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

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China. Correspondent: GAO Zhe, E-mail: gaozhe2@yahoo.cn)

Abstract: A class of fuzzy observer is designed for the T-S fuzzy system with immeasurable premise variable. The fuzzy T-S system is changed into the descriptor system. A class of fuzzy observer is proposed for the descriptor system, the control input variable disappears in the error equation of this kind observer. By Lagrange theorem, the fuzzy observer design problem is transformed into the problem of solving the linear matrix inequality for the fuzzy system with disturbance in the measure part. This method is applied for the arc length observing in the gas metal arc welding(GMAW) system. The simulation results show the validity of this approach.

Key words: T-S fuzzy system; fuzzy observer; arc length observing; descriptor system

1 引 言

熔化极气体保护焊(GMAW)由于焊接效果好、效率高,已成为人们常用的主要焊接方式,而脉冲式GMAW焊接方法以其熔滴过渡可控性强、平均电流低以及方向性强等特点适用于全方位焊接,得到了较为广泛的应用^[1-2].在实际焊接过程中,控制电弧弧长的稳定是保证GMAW焊接过程的重要因素.但是,实际焊接过程的弧长信息是不可以直接测量的,而GMAW系统又是一个非线性系统,直接对电流进行测量会存在一定误差.为此,本文提出一类非线性鲁棒观测器,以实现弧长信息的有效估计.

本文将GMAW系统转化为用T-S模糊模型描述的系统,设计了基于 H_∞ 观测器方法实现对弧长的观测.文献[3]讨论了没有扰动情况下T-S模糊系统的观

测器设计问题; [4]讨论了基于带观测器输出反馈的T-S模糊 H_∞ 设计方法,但假定控制输入是状态变量的线性组合; [5]将广义系统的设计方法应用于T-S模糊系统,扩展了系统的稳定条件; [6-7]将一般的T-S模糊系统转化为一类广义系统,讨论了观测器设计问题,并将其应用于故障诊断中; [8]则讨论了模糊广义系统的鲁棒滤波器设计问题; 由于实际模糊系统的前件变量一般是未知的, [9]针对这类模糊系统的鲁棒滤波器进行了讨论,但没有考虑控制输入对系统的影响.实际上,如果控制变量前面的非线性项含有不可测的前件变量,则控制输入不可能在观测器误差方程中被抵消.

本文通过选取增广状态变量将T-S模糊系统转化为广义系统的形式,使得观测器的误差方程与

收稿日期: 2009-12-28; 修回日期: 2010-03-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50807005).

作者简介: 高哲(1983-),男,博士生,从事模糊系统的研究; 廖晓钟(1962-),女,教授,博士生导师,从事控制理论及其在电气传动和能源变换中的应用等研究.

控制变量无关. 通过应用多元函数的拉格朗日中值定理, 解决了模糊系统未知的前件变量对隶属度函数的影响. 基于 H_∞ 滤波器设计思想, 设计了模糊 H_∞ 观测器, 实现了对测量端含有扰动的模糊 T-S 系统状态的有效测量. 最后将这种观测器设计方法应用到 GMAW 系统的弧长观测器的设计, 实现了在测量端电流值含有扰动情况下对弧长的快速有效估计.

2 问题描述

考虑如下以第 i 条模糊规则描述的 T-S 模糊系统:

$$R^i: \text{If } \zeta_1 \text{ is } F_1^i \text{ and } \zeta_2 \text{ is } F_2^i \text{ and } \cdots \zeta_p \text{ is } F_p^i, \\ \text{Then } \dot{x} = A_i x + B_i u. \quad (1)$$

其中: x 为系统状态; u 为控制输入; $i = 1, 2, \dots, r$, r 为模糊规则数; F_j^i ($j = 1, 2, \dots, p$) 为模糊集合; ζ_j 为前件变量且为系统状态 x 的函数; p 为前件变量数; $w_{i,j}(x)$ 为第 i 条规则的第 j 个前件变量对应的隶属度函数; A_i 和 B_i 为第 i 个子系统的系统矩阵和控制矩阵. 利用单点模糊化、乘积推理和中心加权反模糊化方法, 可得到总的模糊 T-S 系统为

$$\dot{x} = \frac{\sum_{i=1}^r \prod_{j=1}^p w_{i,j}(x) (A_i x + B_i u)}{\sum_{i=1}^r \prod_{j=1}^p w_{i,j}(x)}. \quad (2)$$

令

$$h_i(x) = \frac{\prod_{j=1}^p w_{i,j}(x)}{\sum_{i=1}^r \prod_{j=1}^p w_{i,j}(x)},$$

则有 $\sum_{i=1}^r h_i(x) = 1, 0 \leq h_i(x) \leq 1$. 若假设系统的输出方程为线性, 则由前述假设和方程 (2) 可得

$$\begin{cases} \dot{x} = \sum_{i=1}^r h_i(x) (A_i x + B_i u), \\ y = Cx + Du + Fw, \\ z = Lx. \end{cases} \quad (3)$$

其中: w 为测量端的干扰, y 为系统的输出, z 为观测量, $A_i \in R^{n \times n}$, $B_i \in R^{n \times p}$, $C \in R^{q \times n}$, $D \in R^{q \times p}$, $L \in R^{s \times n}$, n 为系统的阶次, p 为输入量的阶次, q 为输出量的阶次, s 为观测量的阶次.

假设前件变量未知, 则根据并联补偿的思想可以设计如下模糊观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \sum_{i=1}^r h_i(\hat{x}) [A_i \hat{x} + B_i u + G(y - C\hat{x} - Du)], \\ \hat{z} = L\hat{x}. \end{cases} \quad (4)$$

其中: \hat{x} 为 x 的估计值, $G \in R^{n \times q}$. 若令 $e = x - \hat{x}$, 则有

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x} - \dot{\hat{x}} = \\ &= \sum_{i=1}^r h_i(x) A_i x - \sum_{i=1}^r h_i(\hat{x}) A_i \hat{x} + \sum_{i=1}^r h_i(x) B_i u - \\ &= \sum_{i=1}^r h_i(\hat{x}) B_i u + GC(e + Fw). \end{aligned} \quad (5)$$

因为假设前件变量未知, 对应第 i 条规则的隶属函数并不相等, 所以在误差方程中将会出现控制变量 u , 从而文献 [3] 的观测器设计方法不再适用. 同时, 方程 (5) 不能写成仅仅关于误差 e 和干扰 w 的形式, 一般的 H_∞ 鲁棒设计方法也不适用. 下面利用广义系统的设计方法和多元函数的拉格朗日定理, 设计一类新的模糊 H_∞ 控制器.

3 模糊 H_∞ 观测器设计

因为 $\sum_{i=1}^r h_i(x) = \sum_{i=1}^r h_i(\hat{x}) = 1$, 所以可将式 (3) 和 (4) 化为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x} = A_1 x + B_1 u + \sum_{i=2}^r h_i(x) (\tilde{A}_i x + \tilde{B}_i u), \\ y = Cx + Du + Fw, \\ z = Lx; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A_1 \hat{x} + B_1 u + \sum_{i=2}^r h_i(\hat{x}) [\tilde{A}_i \hat{x} + \\ \tilde{B}_i u + G(y - C\hat{x} - Du)], \\ \hat{z} = L\hat{x}. \end{cases} \quad (7)$$

令

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix}, \quad \hat{\bar{x}} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ u \end{bmatrix},$$

$$h_i(x) = h_i(\bar{x}), \quad h_i(\hat{x}) = h_i(\hat{\bar{x}}),$$

则可将式 (6) 和 (7) 化为如下的广义系统形式:

$$\begin{cases} E\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + Nu + \Delta A\bar{x}, \\ y = \bar{C}\bar{x} + Fw, \\ z = \bar{L}\bar{x}; \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} E\dot{\hat{\bar{x}}} = \bar{A}\hat{\bar{x}} + Nu + \Delta \hat{A}\hat{\bar{x}} + \bar{G}(y - \bar{C}\hat{\bar{x}}), \\ \hat{z} = \bar{L}\hat{\bar{x}}. \end{cases} \quad (9)$$

这样, 在状态误差方程中便不再含有控制量 u . 其中

$$E = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{A} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ 0 & -I \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix},$$

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = [C \ D], \quad \bar{L} = [L \ 0],$$

$$\Delta A\bar{x} = \sum_{i=2}^r h_i(\bar{x}) \tilde{A}_i \bar{x}, \quad \Delta \hat{A}\hat{\bar{x}} = \sum_{i=2}^r h_i(\hat{\bar{x}}) \tilde{A}_i \hat{\bar{x}},$$

$$\tilde{A}_i = \begin{bmatrix} \tilde{A}_i & \tilde{B}_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{A}_i = A_i - A_1, \quad \tilde{B}_i = B_i - B_1,$$

\$I\$ 为适当维数的单位矩阵.

设 \$e = \bar{x} - \hat{x}\$, 考虑式 (8) 和 (9), 则有

$$\begin{cases} E\dot{e} = (\bar{A} - \bar{G}\bar{C})e + \Delta A\bar{x} - \Delta \hat{A}\hat{x} + \bar{G}Fw, \\ e_z = z - \hat{z} = \bar{L}e. \end{cases} \quad (10)$$

为实现在测量端存在扰动 \$w\$ 情况下, 有效地获得观测量 \$z\$, 所设计的 \$H_\infty\$ 观测器应满足以下 2 个条件:

- 1) 当 \$w = 0\$ 时, 系统 (10) 稳定;
- 2) 在 \$e(0) = 0\$ 时, 满足 \$\|e_z\|_2 \leq \gamma\|w\|_2\$, 其中

$$\|x\|_2 = \int_0^\infty x^T x dt.$$

定理 1 若存在矩阵 \$P\$ 和向量 \$\xi_{i,j} \in R^{n+p}\$, 使广义系统 (10) 满足如下条件:

$$E^T P = P^T E \geq 0, \quad (11)$$

$$P^T \left[\bar{A} - \bar{G}\bar{C} + \sum_{i=2}^r \tilde{A}_i M_i \right] + \left[\bar{A} - \bar{G}\bar{C} + \sum_{i=2}^r \tilde{A}_i M_i \right]^T P < 0, \quad (12)$$

则当 \$w = 0\$ 时, 系统 (10) 稳定. 其中

$$M_i = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial [h_i(\bar{x})\bar{x}_1]}{\partial \bar{x}_1} \right|_{\bar{x}=\xi_{i,1}} & \left. \frac{\partial [h_i(\bar{x})\bar{x}_1]}{\partial \bar{x}_2} \right|_{\bar{x}=\xi_{i,1}} \\ \left. \frac{\partial [h_i(\bar{x})\bar{x}_2]}{\partial \bar{x}_1} \right|_{\bar{x}=\xi_{i,2}} & \left. \frac{\partial [h_i(\bar{x})\bar{x}_2]}{\partial \bar{x}_2} \right|_{\bar{x}=\xi_{i,2}} \\ \vdots & \vdots \\ \left. \frac{\partial [h_i(\bar{x})\bar{x}_{n+p}]}{\partial \bar{x}_1} \right|_{\bar{x}=\xi_{i,n+p}} & \left. \frac{\partial [h_i(\bar{x})\bar{x}_{n+p}]}{\partial \bar{x}_2} \right|_{\bar{x}=\xi_{i,n+p}} \\ \dots & \left. \frac{\partial [h_i(\bar{x})\bar{x}_1]}{\partial \bar{x}_{n+p}} \right|_{\bar{x}=\xi_{i,1}} \\ \dots & \left. \frac{\partial [h_i(\bar{x})\bar{x}_2]}{\partial \bar{x}_{n+p}} \right|_{\bar{x}=\xi_{i,2}} \\ \dots & \vdots \\ \dots & \left. \frac{\partial [h_i(\bar{x})\bar{x}_{n+p}]}{\partial \bar{x}_{n+p}} \right|_{\bar{x}=\xi_{i,n+p}} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

\$\bar{x}_k\$ 是 \$\bar{x}\$ 的第 \$k\$ 个分量, 且

$$\xi_{i,j} = \bar{x} + \theta(\hat{x} - \bar{x}), \quad 0 \leq \theta \leq 1.$$

证明 定义矩阵

$$P = \begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ X_2 & X_3 \end{bmatrix},$$

且 \$X_1^T = X_1 > 0\$, 则等式 (11) 成立.

假设 \$h_i(\bar{x})\bar{x}_j\$ 为可微函数, 则根据多元函数的拉格朗日中值定理, 有以下关系式成立:

$$\Delta A\bar{x} - \Delta \hat{A}\hat{x} = \sum_{i=2}^r h_i(\bar{x})\tilde{A}_i\bar{x} - \sum_{i=2}^r h_i(\hat{x})\tilde{A}_i\hat{x} =$$

$$\sum_{i=2}^r \tilde{A}_i [h_i(\bar{x})\bar{x} - h_i(\hat{x})\hat{x}] = \sum_{i=2}^r \tilde{A}_i M_i \begin{bmatrix} \bar{x}_1 - \hat{x}_1 \\ \bar{x}_2 - \hat{x}_2 \\ \vdots \\ \bar{x}_{n+p} - \hat{x}_{n+p} \end{bmatrix} = \sum_{i=2}^r \tilde{A}_i M_i e. \quad (14)$$

其中: \$\xi_{i,j} = \bar{x} + \theta(\hat{x} - \bar{x}), 0 \leq \theta \leq 1\$.

将式 (14) 代入 (10), 可得

$$E\dot{e} = \left[\bar{A} - \bar{G}\bar{C} + \sum_{i=2}^r \tilde{A}_i M_i \right] e. \quad (15)$$

定义如下 Lyapunov 函数:

$$V = e^T E^T P e, \quad (16)$$

则对式 (16) 求导, 并考虑条件 (11), 将式 (15) 代入, 得

$$\dot{V} = e^T \left\{ P^T \left[\bar{A} - \bar{G}\bar{C} + \sum_{i=2}^r \tilde{A}_i M_i \right] + \left[\bar{A} - \bar{G}\bar{C} + \sum_{i=2}^r \tilde{A}_i M_i \right]^T P \right\} e. \quad (17)$$

因此, 当式 (12) 成立时, \$\dot{V} < 0\$, 广义系统 (10) 稳定. \$\square\$

引理 1 设 \$E\$ 和 \$F\$ 是适当维数的矩阵, 若 \$\varepsilon > 0\$, 则有如下不等式成立^[10]:

$$E^T F + F^T E \leq \varepsilon E^T E + \frac{1}{\varepsilon} F^T F. \quad (18)$$

定理 2 若存在正定矩阵 \$X_1\$, 矩阵 \$X_2, X_3, K\$, 正实数 \$\varepsilon, \gamma\$ 满足

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & KF & X_1 \\ * & -X_3^T - X_3 + \lambda\varepsilon I & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma I & 0 \\ * & * & * & \varepsilon I \end{bmatrix} < 0, \quad (19)$$

则所设计的观测器满足 \$H_\infty\$ 观测器的设计要求. 其中: \$R_1 = X_1 A_1 - KC + A_1^T X_1 - C^T K^T + L^T L + \lambda\varepsilon I\$; \$R_2 = X_1 B_1 - KD + B_1^T X - D^T K^T - X_2^T\$; \$\lambda\$ 为 \$\xi_{i,j}\$ 在 \$\bar{x}\$ 最大最小值之间变化时 \$\Psi_1^T \Psi_1 + \Psi_2^T \Psi_2\$ 的最大的迹, 且 \$\begin{bmatrix} \Psi_1 & \Psi_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \sum_{i=2}^r \tilde{A}_i M_i\$; “*” 为矩阵对称元素; 观测器的设计参数 \$G = X_1^{-1} K\$.

证明 取系统 (10) 的 Lyapunov 函数如式 (16) 所示, 则对其求导可得

$$\dot{V} = \begin{bmatrix} e \\ w \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} R_3 & P^T \bar{G} F \\ F^T \bar{G}^T P & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ w \end{bmatrix}. \quad (20)$$

其中

$$R_3 = P^T \left[\bar{A} - \bar{G}\bar{C} + \sum_{i=2}^r \tilde{A}_i M_i \right] + \left[\bar{A} - \bar{G}\bar{C} + \sum_{i=2}^r \tilde{A}_i M_i \right]^T P.$$

假设 \$e(0) = 0\$, 若 \$\dot{V} + e_z^T e_z - \gamma w^T w < 0\$, 则有 \$\|e_z\|_2 \leq \gamma\|w\|_2\$, 满足 \$H_\infty\$ 观测器存在的第 2 个条件, 即下式

成立:

$$\begin{bmatrix} R_3 + \bar{L}^T \bar{L} & P^T \bar{G} F \\ F^T \bar{G}^T P & -\gamma I \end{bmatrix} < 0, \quad (21)$$

$$P^T \left[\bar{A} - \bar{G} \bar{C} + \sum_{i=2}^r \tilde{A}_i M_i \right] + \left[\bar{A} - \bar{G} \bar{C} + \sum_{i=2}^r \tilde{A}_i M_i \right]^T P < -\bar{L}^T \bar{L} < 0. \quad (22)$$

若不等式(22)成立, 则有不等式(12)成立, 所以所设计的观测器满足不等式(19)的约束条件时为 H_∞ 观测器.

根据 M_i 的定义, 可将 M_i 展开, 得

$$M_i = \begin{bmatrix} M_{i1} & 0 \\ M_{i2} & M_{i3} \end{bmatrix},$$

所以

$$\begin{aligned} \sum_{i=2}^r \tilde{A}_i M_i &= \\ & \begin{bmatrix} \sum_{i=2}^r \tilde{A}_i M_{i1} + \sum_{i=2}^r \tilde{B}_i M_{i2} & \sum_{i=2}^r \tilde{B}_i M_{i3} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} \Psi_1 & \Psi_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (23)$$

将 $\bar{A}, \bar{G}, \bar{C}, \bar{L}, P$ 代入式(21), 可得

$$F_1 = \begin{bmatrix} R_4 + X_1 \Psi_1 + \Psi_1^T X_1 & R_5 + X_1 \Psi_2 & X_1 G F \\ * & -X_3^T - X_3 & 0 \\ * & * & -\gamma I \end{bmatrix} < 0. \quad (24)$$

其中: $R_4 = X_1(A_1 - GC) + (A_1 - GC)^T X_1 + L^T L$, $R_5 = X_1(B_1 - GD) + (B_1 - GD)^T X_1 - X_2^T$.

若矩阵 $MM^T \leq \lambda_m I$, 则 $M^T M \leq \lambda_m I$, 其中 λ_m 为 MM^T 最大特征值, 所以当 λ_m 是

$$[\Psi_1 \ \Psi_2 \ 0][\Psi_1 \ \Psi_2 \ 0]^T$$

的最大特征值时, 如下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Psi_1 & \Psi_2 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \lambda_m I & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_m I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (25)$$

一般情况下最大特征值不易计算. 但是, 式(25)左边的矩阵特征值都大于等于零, 所以矩阵的迹可以代替 λ_m , 从而可利用最优化的方法计算当 $\xi_{i,j}$ 在 \bar{x} 最大最小值之间变化时矩阵的最大迹 λ . 根据引理 1 和定理 1 的假设条件以及 Schur 补引理, 并假设

$$N = \begin{bmatrix} R_4 & R_5 & X_1 G F \\ * & -X_3^T - X_3 & 0 \\ * & * & -\gamma I \end{bmatrix},$$

则有

$$F_1 =$$

$$N + \begin{bmatrix} X_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\Psi_1 \ \Psi_2 \ 0] + [\Psi_1 \ \Psi_2 \ 0]^T \begin{bmatrix} X_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} < \\ N + \frac{1}{\varepsilon} \begin{bmatrix} X_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [X_1 \ 0 \ 0] + \lambda \varepsilon \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} < 0. \quad (26)$$

根据 Schur 补引理, 不等式(26)成立等价于如下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} R_4 + \lambda \varepsilon I & R_5 & X_1 G F & X_1 \\ * & -X_3^T - X_3 + \lambda \varepsilon I & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma I & 0 \\ * & * & * & \varepsilon I \end{bmatrix} < 0. \quad (27)$$

因此, 不等式(27)成立, 则式(19)成立, 从而所设计的观测器满足 H_∞ 观测器的 2 个设计条件. 令 $X_1 G = K$, 则定理 2 成立. \square

4 GMAW 系统弧长观测仿真分析

GMAW 系统的数学模型可用电压平衡和弧长平衡方程描述^[11-12]如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = [C_1 x_2 + C_2 \rho x_2^2 (C_T - x_1)] / \pi r_w^2 - v_m, \\ \dot{x}_2 = \{u - [R_a + R_s + \rho(C_T - x_1)]x_2 - U_0 - E_a x_1\} / L_s. \end{cases} \quad (28)$$

其中: x_1 为焊接弧长, x_2 为焊接回路电流, C_1 和 C_2 为焊接常数, ρ 为单位长度的电阻值, v_m 为送丝速度, u 为电源输出电压, C_T 为焊枪嘴到焊接工件的距离, U_0 为阳极与阴极压降之和, E_a 为弧柱的电场强度, R_a 为电弧等效电阻, R_s 和 L_s 分别为电源端的电阻和电感值. GMAW 结构如图 1 所示.

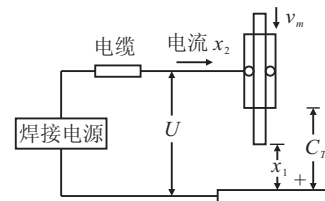


图 1 GMAW 系统的结构图

由于 x_2 为焊接电流, 是可测的, 根据 x_2 的取值范围, 可获得式(28)的 T-S 模糊模型. 设 x_2 的取值范围为 $m \leq x_2 \leq M$, x_2^2 的取值范围为 $n \leq x_2^2 \leq N$, 则根据最大最小方法, 可以得到 GMAW 系统的 T-S 模糊模型如下:

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

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} c_1 N & a_1 + c_3 M \\ a_2 + c_2 M & a_3 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix};$$

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

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} c_1 n & a_1 + c_3 M \\ a_2 + c_2 M & a_3 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix};$$

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

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} c_1 N & a_1 + c_3 m \\ a_2 + c_2 m & a_3 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix};$$

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

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} c_1 n & a_1 + c_3 m \\ a_2 + c_2 m & a_3 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}.$$

且隶属度函数如下:

$$w_{1,1} = w_{2,1} = \frac{x_2 - m}{M - m}, w_{3,1} = w_{4,1} = \frac{M - x_2}{M - m},$$

$$w_{1,2} = w_{3,2} = \frac{x_2^2 - n}{N - n}, w_{2,2} = w_{4,2} = \frac{N - x_2^2}{N - n}.$$

其中: $a_1 = C_1/\pi r_w^2, a_2 = -E_a/L_s, a_3 = -(R_a + R_s + \rho C_T)/L_s, c_1 = -C_2 \rho/\pi r_w^2, c_2 = \rho/L_s, c_3 = C_2 \rho C_T/\pi r_w^2, b = 1/L_s, e_1 = -v_m, e_2 = -U_0/L_s.$

根据定理2设计模糊 H_∞ 观测器, 仿真参数见文献[11], 分别为

$$C_T = 0.02 \text{ m}, C_1 = 2.8855 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{A},$$

$$C_2 = 5.22 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{A}^2\Omega, E_a = 1500 \text{ V/m},$$

$$U_0 = 15.7 \text{ V}, R_a = 0.022 \Omega, R_s = 0.001 \Omega,$$

$$L_s = 0.35 \text{ e}^{-6} \text{ H}, r_w = 0.001 \text{ m}, v = 0.1 \text{ m/s}.$$

并设 $M = 600 \text{ A}, N = M^2, \gamma = 0.1, x_1(0) = 2 \times 10^{-3} \text{ m}, \hat{x}_1(0) = 0 \text{ m}.$ 由于弧长的电流取值范围相差比较大, 取 $z_1 = 1000 x_1, z_2 = 0.01 x_2$ 作为一组新的状态变量. 通过 Matlab 计算, 得 $G = [-1663.3 \quad 6227], \lambda = 4.4921 \times 10^7.$ 仿真结果如图2~图6所示.

图2为 GMAW 系统脉冲形式的控制电压; 图3

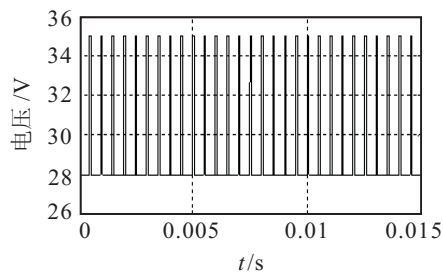


图2 GMAW 系统的输入电压

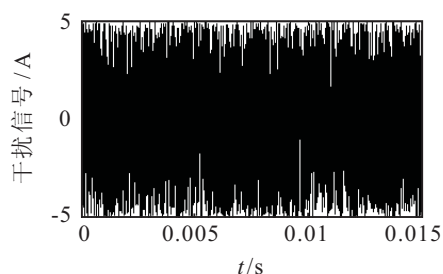


图3 电流反馈的干扰信号

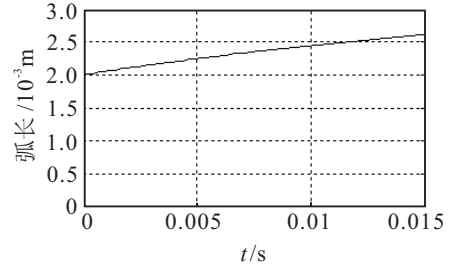


图4 GMAW 的弧长响应

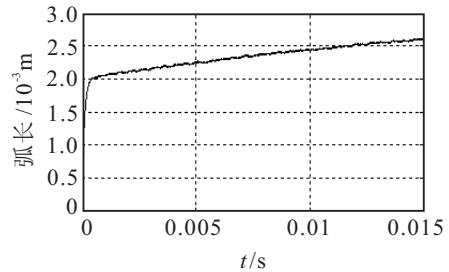


图5 观测器输出响应

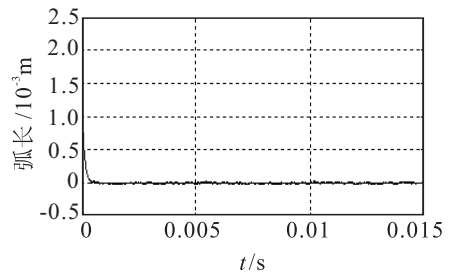


图6 弧长误差变化曲线

为测量端干扰信号, 取观测器参数 $F = 1$; 图4和图5分别为非线性 GMAW 和观测器在 $\gamma = 0.1$ 时, 弧长响应曲线和观测曲线; 图6为弧长观测误差. 由图6的变化曲线可以看出, 弧长误差在 $6 \times 10^{-4} \text{ s}$ 时便接近于零, 可见所设计的模糊 H_∞ 观测器可以在很短的时间内实现对弧长的有效观测.

5 结 论

本文将广义系统的设计方法应用于 T-S 模糊系统的观测器设计, 解决了前件变量未知情况下的观测器设计问题. 针对测量端含有扰动信号的情况, 利用 LMI 方法, 并仿照 H_∞ 滤波器的设计思想设计了模糊 H_∞ 观测器. 将其应用于 GMAW 系统, 可快速有效地实现对弧长变量的有效观测.

参考文献(References)

[1] 黄鹏飞, 卢振洋, 吕耀辉, 等. 熔化极脉冲氩弧焊弧长动态调节性能研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(1): 193-197.
(Huang P F, Lu Z Y, Lv Y H, et al. Study on the arc dynamic adjusting characteristic of pulsed MIG welding[J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2005, 41(1): 193-197.)

- [2] Zhu J H, Song S Z, Shi H X, et al. Investigation on control strategies for pulse gas metal arc welding process[C]. Proc of 3rd IEEE Industrial Electronics and Applications. New York: IEEE Press, 2008: 1276-1281.
- [3] Tanaka K, Ikeda T, Wang H O, et al. Fuzzy regulators and fuzzy observers: Relaxed stability conditions and LMI-based design[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1998, 6(2): 250-265.
- [4] Nguang S K, Shi P. H_∞ fuzzy output feedback control design for nonlinear systems: An LMI approach[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2003, 11(3): 331-340.
- [5] Tanaka K, Ohtake H, Wang H O. A descriptor system approach to fuzzy control system design via fuzzy Lyapunov functions[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2007, 15(3): 333-341.
- [6] Gao Z W, Shi X Y, Steven X D. Fuzzy state/disturbance observer design for T-S fuzzy systems with application to sensor fault estimation[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics — Part B: Cybernetics, 2008, 38(3): 875-880.
- [7] 周琳娜, 张庆灵, 胡跃冰, 等. T-S 模糊系统的稳定性分析与镇定控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2005, 41(1): 193-197.
- (Zhou L N, Zhang Q L, Hu Y B, et al. Stability analysis and synthesis of T-S fuzzy systems[J]. Control Theory & Application, 2007, 24(6): 886-890.)
- [8] 陈金香, 杨卫东. 模糊奇异摄动系统 H_∞ 滤波[J]. 控制与决策, 2008, 23(12): 1395-1400.
- (Chen J X, Yang W D. H_∞ filtering for fuzzy singularly perturbed systems[J]. Control and Decision, 2008, 23(12): 1395-1400.)
- [9] 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.
- [10] Boyd S, Ghaoui L E, Feron E Balakrishman V. Linear matrix inequalities in system and control theory[M]. Philadelphia: SIAM, 1994: 32-34.
- [11] Abdelrahman M. Feedback linearization control of current and arc length in GMAW systems[C]. Proc of the 1998 American Control Conf. New York: IEEE Press, 1998: 1757-1761.
- [12] Thomsen J S. Feedback linearization based arc length control for gas metal arc welding[C]. Proc of the 2005 American Control Conf. New York: IEEE Press, 2005: 3568-3573.

(上接第386页)

- [8] Ratnaweera A, Halgamuge S K, Watson H C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration co-efficients[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 240-255.
- [9] Maurice Clerc. The swarm and the queen: Towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization[C]. Proc Congress on Evolutionary Computation. Washington: IEEE Service Center, 1999: 1927-1930.
- [10] 谷良贤, 王轶鹏, 龚春林. 基于概率突跳和模拟退火的改进自适应微粒群算法[J]. 控制与决策, 2009, 24(4): 617-621.
- (Gu L X, Wang Y P, Gong C L. Adaptive particle swarm optimization based on probabilistic jumping and simulated annealing[J]. Control and Decision, 2009, 24(4): 617-621.)
- [11] 高芳, 崔刚, 吴智博, 等. 一种新型多步式位置可选择更新粒子群优化算法[J]. 电子学报, 2009, 37(3): 529-534.
- (Gao F, Cui G, Wu Z B, et al. A new multi-step location updated and chosen particle swarm optimization algorithm[J]. Electronic J, 2009, 37(3): 529-534.)
- [12] Bin Jiao, Zhigang Lian, Qunxian Chen. A dynamic global and local combined particle swarm optimization algorithm[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2009, 42(5): 2688-2695.
- [13] Murat Gokcek, Ahmet Bayülken, Stükrü Bekdemir. Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kirklareli, Turkey[J]. Renewable Energy, 2007, 32(10): 1742-1745.
- [14] JoséA Carta, Penélope Ramírez, Sergio Velázquez. Influence of the level of fit of a density probability function to wind-speed data on the WECS mean power output estimation[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(10): 2647-2655.
- [15] Cellura M, Cirrincione G, Marvuglia A, et al. Wind speed spatial estimation for energy planning in sicily: Introduction and statistical analysis[J]. Renewable Energy, 2008, 33(6): 1239-1250.
- [16] Carta J A, Ramírez P. Analysis of two-component mixture Weibull statistics for estimation of wind speed distributions[J]. Renewable Energy, 2007, 32(3): 518-531.
- [17] Eskin N, Artar H, Tolun S. Wind energy potential of Gokceada Island in Turkey[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 2(8): 139-151.
- [18] Shamilov A, Kantar Y M, Usta I. Use of MinMaxEnt distributions defined on basis of MaxEnt method in wind power study[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(4): 660-677.