



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106444383 A

(43)申请公布日 2017.02.22

(21)申请号 201610976929.7

(22)申请日 2016.10.27

(71)申请人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西
大直街92号

申请人 哈尔滨工大瑞驰高新技术有限公司

(72)发明人 王常虹 夏红伟 马广程 马倩倩
张大力

(74)专利代理机构 北京君恒知识产权代理事务
所(普通合伙) 11466

代理人 黄启行 张璐

(51)Int.Cl.

G05B 13/04(2006.01)

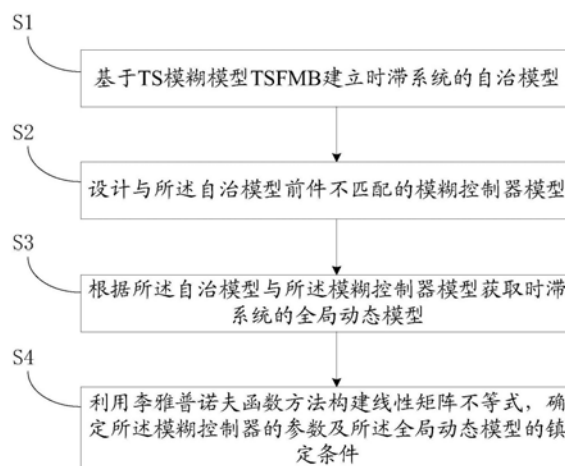
权利要求书2页 说明书13页 附图1页

(54)发明名称

前件不匹配的TSFMB时滞系统控制方法

(57)摘要

本发明基于T-S模糊模型理论建立非线性时滞系统的动力学数学模型,设计的模糊控制器具有和系统模型不一样的模糊规则前件和模糊规则数目,将系统模型和模糊控制器模型串联,得到系统的全局动态模型;根据Lyapunov稳定性理论推导自治系统的两种稳定性条件;利用自治系统的稳定性条件和系统模型,进行线性化处理,推导镇定条件,并设计相应的模糊控制器。本发明中所设计的稳定性条件和镇定条件都是以线性矩阵不等式的形式呈现,便于仿真计算以及实现,与同类方法相比保守性较小。与现有技术相比,本发明可以自由选择隶属度函数,减小控制器设计复杂度,对不确定系统具有较好的鲁棒性。



1. 一种前件不匹配的TSFMB时滞系统控制方法,其特征在于,包括步骤:

S1. 基于TS模糊模型TSFMB建立时滞系统的自治模型;

S2. 设计与所述自治模型前件不匹配的模糊控制器模型;

S3. 根据所述自治模型与所述模糊控制器模型获取时滞系统的全局动态模型;

S4. 利用李雅普诺夫函数方法构建线性矩阵不等式,确定所述模糊控制器的参数及所述全局动态模型的镇定条件;其中,

所述前件不匹配指的是所述自治模型与所述模糊控制器模型的模糊规则前件、隶属度函数、模糊规则总数均不同。

2. 如权利要求1所述的方法,所述时滞系统为常时滞系统或分布时滞系统。

3. 如权利要求2所述的方法,所述自治模型由公式1确定:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^p w_i (A_i x(t) + A_{1i} x(t-h) + A_{2i} \int_{t-h}^t x(s) ds) \quad \text{公式 1}$$

其中, $x(t) \in \mathbb{R}^n$, 是状态向量, $i=1, 2, \dots, p$; p 是正整数, 为自治模型模糊规则总数; w_i 是自治模型标准化的隶属度函数; A_i, A_{1i}, A_{2i} 是已知的系统矩阵; h 为时滞。

4. 如权利要求3所述的方法,所述控制器模型由公式2确定:

$$u(t) = \sum_{j=1}^c m_j K_j x(t) \quad \text{公式 2}$$

其中, $u(t)$ 是控制量; $j=1, 2, \dots, c$; c 是正整数, 为控制器模型模糊规则总数; m_j 是控制器模型标准化的隶属度函数; K_j 为第 j 条规则的反馈增益矩阵。

5. 如权利要求4所述的方法,所述全局动态模型由公式3确定:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^c w_i m_j (G_{ij} x(t) + A_{1i} x(t-h) + A_{2i} \int_{t-h}^t x(s) ds) \quad \text{公式 3}$$

其中, $G_{ij} = A_i + B_i K_j$, B_i 是输入矩阵。

6. 如权利要求5所述的方法,还包括:利用李雅普诺夫函数方法构建线性矩阵不等式,确定所述自治模型的稳定条件。

7. 如权利要求6所述的方法,所述自治模型的稳定条件由公式4获得:

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} + \Phi_3 + \Phi_{4i} & \sqrt{h}N_1 & \sqrt{h}N_2 & \sqrt{h}N_3 \\ * & -R & 0 & 0 \\ * & * & -3R & 0 \\ * & * & * & -5R \end{bmatrix} < 0 \quad \text{公式 4}$$

其中, $R \in \mathbb{R}^{n \times n} > 0$; $N_1, N_2, N_3 \in \mathbb{R}^{4n \times n}$; $\Phi_{1i} = \text{Sym} \{ \Delta_i^T P \Delta_{5i} \} + e_1^T Q e_1 - e_2^T Q e_2 + h \Gamma_i^T R \Gamma_i$; $\Phi_3 = \text{Sym} \{ N_1 \Delta_1 + N_2 \Delta_2 + N_3 \Delta_3 \}$; $\Phi_{4i} = T_i - F_i + \sum_{r=1}^p \bar{h}_r F_r - \sum_{k=1}^p \underline{h}_k T_k$; $\Delta_1 = e_1 - e_2$, $P \in \mathbb{R}^{3n \times 3n} > 0$, $\Delta_2 = e_1 + e_2 - 2e_3$, $\Delta_3 = e_1 - e_2 - 6e_3 + 6e_4$, $\Delta_4 = [e_1^T \quad h e_3^T \quad \frac{h^2}{2} e_4^T]^T$, $\text{Sym}(A) = A + A^T$, $\Delta_{5i} = [\Gamma_i^T \quad e_1^T - e_2^T \quad h e_3^T - h e_4^T]^T$, $e_0 = [0_{n \times (\theta-1)n} \quad I_n \quad 0_{n \times (4-\theta)n}]$, $\theta = 1, 2, 3, 4$, $Q \in \mathbb{R}^{n \times n} > 0$, $F_i > 0$, $T_i > 0$, $\Gamma_i = [A_i \quad A_{1i} \quad h A_{2i} \quad 0]$; $\bar{h}_i \geq h_i$, 是 h_i 的上界; $\underline{h}_i \leq h_i$, 是 h_i 的下界; $h_i = w_i$ 。

8. 如权利要求6所述的方法,所述自治模型的稳定条件由公式5获得:

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} + \Phi_3 & \sqrt{h}N_1 & \sqrt{h}N_2 & \sqrt{h}N_3 \\ * & -R & 0 & 0 \\ * & * & -3R & 0 \\ * & * & * & -5R \end{bmatrix} < 0 \quad \text{公式 5}$$

其中, $R \in R^{n \times n} > 0$; $N_1, N_2, N_3 \in R^{4n \times n}$; $\Phi_{1i} = \text{Sym}\{\Delta_4^T P \Delta_{5i}\} + e_1^T Q e_1 - e_2^T Q e_2 + h \Gamma_i^T R \Gamma_i$; $\Phi_3 = \text{Sym}\{N_1 \Delta_1 + N_2 \Delta_2 + N_3 \Delta_3\}$; $\Delta_1 = e_1 - e_2$, $\Delta_2 = e_1 + e_2 - 2e_3$, $\Delta_3 = e_1 - e_2 - 6e_3 + 6e_4$, $\Delta_4 = [e_1^T \quad h e_3^T \quad \frac{h^2}{2} e_4^T]^T$, $\text{Sym}(A) = A + A^T$, $P \in R^{3n \times 3n} > 0$, $\Delta_{5i} = [\Gamma_i^T \quad e_1^T - e_2^T \quad h e_3^T - h e_4^T]^T$, $e_0 = [0_{n \times (0-1)n} \quad I_n \quad 0_{n \times (4-0)n}]$, $\theta = 1, 2, 3, 4$, $Q \in R^{n \times n} > 0$, $\Gamma_i = [A_i \quad A_{1i} \quad h A_{2i} \quad 0]$ 。

9. 如权利要求7或8所述的方法,所述模糊控制器的参数及所述全局动态模型的镇定条件由公式6确定:

$$\Phi_{ij} = \begin{bmatrix} \Pi_1 & \sqrt{h}\bar{N}_1 & \sqrt{h}\bar{N}_2 & \sqrt{h}\bar{N}_3 & \sqrt{h}\bar{\Gamma}_{ij}^T \\ * & -\bar{R} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -3\bar{R} & 0 & 0 \\ * & * & * & -5\bar{R} & 0 \\ * & * & * & * & \frac{1}{\delta^2}\bar{R} - \frac{2}{\delta}X \end{bmatrix} < 0 \quad \text{公式 6}$$

其中, $\bar{R} \in R^{n \times n} > 0$, $\bar{N}_1, \bar{N}_2, \bar{N}_3 \in R^{4n \times n}$, δ 为常数, $\Pi_1 = \bar{\Phi}_{1ij} + \bar{\Phi}_3 + \bar{\Phi}_{4ij}$, $\bar{\Gamma}_{ij} = [G_{ij} \quad A_{1i} \quad h A_{2i} \quad 0]$, $\bar{\Phi}_{1ij} = \text{Sym}\{\Delta_4^T \bar{P} \bar{\Delta}_{5ij}\} + e_1^T \bar{Q} e_1 - e_2^T \bar{Q} e_2$, $\bar{P} \in R^{3n \times 3n} > 0$, $\bar{Q} \in R^{n \times n} > 0$, $\bar{\Phi}_3 = \text{Sym}\{\bar{N}_1 \Delta_1 + \bar{N}_2 \Delta_2 + \bar{N}_3 \Delta_3\}$, $\bar{\Phi}_{4ij} = \bar{T}_{ij} - \bar{F}_{ij} + \sum_{r=1}^p \sum_{s=1}^c \bar{h}_{rs} \bar{F}_{rs} - \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^c \bar{h}_{kl} \bar{T}_{kl}$, $\bar{F}_{ij} > 0, \bar{T}_{ij} > 0$, $\bar{\Delta}_{5ij} = [\bar{\Gamma}_{ij}^T \quad X(e_1^T - e_2^T) \quad X(h e_3^T - h e_4^T)]^T$, $X \in R^{n \times n} > 0$; $\bar{h}_{ij} \geq h_{ij}$, 是 h_{ij} 的上界; $\underline{h}_{ij} \leq h_{ij}$, 是 h_{ij} 的下界; $h_{ij} = w_{imj}$ 。

10. 如权利要求7或8所述的方法,所述模糊控制器的参数及所述全局动态模型的镇定条件由公式7确定:

$$\Phi_{ij} \leq \begin{bmatrix} \bar{\Phi}_{1ij} + \bar{\Phi}_3 & \sqrt{h}\bar{N}_1 & \sqrt{h}\bar{N}_2 & \sqrt{h}\bar{N}_3 & \sqrt{h}\bar{\Gamma}_{ij}^T \\ * & -\bar{R} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -3\bar{R} & 0 & 0 \\ * & * & * & -5\bar{R} & 0 \\ * & * & * & * & \frac{1}{\delta^2}\bar{R} - \frac{2}{\delta}X \end{bmatrix} < 0 \quad \text{公式 7}$$

其中, $\bar{R} \in R^{n \times n} > 0$, $\bar{N}_1, \bar{N}_2, \bar{N}_3 \in R^{4n \times n}$, δ 为常数, $\bar{\Gamma}_{ij} = [G_{ij} \quad A_{1i} \quad h A_{2i} \quad 0]$, $\bar{\Phi}_{1ij} = \text{Sym}\{\Delta_4^T \bar{P} \bar{\Delta}_{5ij}\} + e_1^T \bar{Q} e_1 - e_2^T \bar{Q} e_2$, $\bar{\Phi}_3 = \text{Sym}\{\bar{N}_1 \Delta_1 + \bar{N}_2 \Delta_2 + \bar{N}_3 \Delta_3\}$, $\bar{Q} \in R^{n \times n} > 0$, $\bar{P} \in R^{3n \times 3n} > 0$, $\bar{\Delta}_{5ij} = [\bar{\Gamma}_{ij}^T \quad X(e_1^T - e_2^T) \quad X(h e_3^T - h e_4^T)]^T$, $X \in R^{n \times n} > 0$ 。

前件不匹配的TSFMB时滞系统控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及控制技术领域,尤其涉及一种前件不匹配的TSFMB时滞系统控制方法。

背景技术

[0002] T-S模糊模型是描述模糊系统最常用的方法,这种方法可以将复杂的非线性系统模型分解为一些不同权重的局部线性模型,这样就可以用传统的线性系统控制方法来控制非线性系统,并且T-S模糊模型可以以任意精度逼近非线性系统。当模糊控制器也被表示为一些不同权重的线性控制器之和,并且与T-S模糊系统模型一起被连接到一个闭环回路时,就形成了TSFMB(TS Fuzzy Model Based,TS模糊模型)控制系统。TSFMB控制系统的优点是可以有效利用Lyapunov-Krasovskii-functional (LKF) 方法进行系统的稳定性分析和镇定分析。LKF方法可以利用线性矩阵不等式(LMIs)来推导出充分的稳定条件和镇定条件。

[0003] 尽管LKF方法可以有效的解决稳定性分析和镇定分析的问题,但是通过LKF推导出的稳定条件和镇定条件始终是保守的。为了减少保守性,已经进行了很多的研究:引进系统状态的三重积分或自由权矩阵以获得更加精确的Lyapunov函数、引入Wirtinger积分不等式以获得更加精确的积分项的界等。但是上述方法的保守性依然较高。

[0004] 另外,当处理模糊系统的分析问题,通常采用的一种控制器设计技巧是并行分布补偿(PDC)方法。PDC方法的基本思想是针对T-S模糊模型的局部线性模型设计线性反馈控制器,然后将这些模糊控制器进行模糊加权组合构成整个非线性系统的反馈控制器,因此模糊控制器和模糊模型要拥有相同的模糊规则前件和隶属度函数。由于PDC方法简单有效,近些年来受到了很多的关注。但是与此同时,PDC方法也具有一些不可避免的缺点,比如限制模糊控制器设计的自由度、在有些情况下选择不必要的复杂的模糊控制器结构等。为了解决这些问题,近些年来提出了一些非PDC的模糊控制器设计方法,其中一种新颖有效的方法叫做前件不完全匹配设计方法。与PDC方法正好相反,这种方法允许模糊控制器和模糊模型具有不同的模糊规则前件和隶属度函数。不完全匹配的模糊控制器设计方法是由Lam在2009年提出的,而且近几年来这种方法也有了一些新的发展,比如利用平方和(SOS)方法来推导稳定性条件,引进阶梯化的隶属度函数进行稳定性分析,把不完全匹配的控制器设计方法推广到具有中立性时滞的非线性系统。

[0005] 此外,时滞是实际工程应用中非常常见的一种现象,但是这种现象会破坏系统的性能,导致系统不稳定。因此关于时滞控制系统的研究具有重要的意义,并且近些年来也取得了一些成果,比如在2000年,Cao和Frank首次将T-S模糊模型应用到了非线性时滞系统的研究中,在进行稳定性分析时候考虑隶属度函数的信息,或者利用各种方法去减小保守性。但是,很少有研究将不完全匹配的控制器设计方法应用到分布时滞系统中。

[0006] 因此,亟需一种新的模糊控制方法以解决以上问题。

发明内容

[0007] 有鉴于此,本发明提供了一种前件不匹配的TSFMB时滞系统控制方法,将前件不匹

配的控制器设计方法应用在常时滞系统与分布时滞系统之中,并且提出了新的积分不等式获得保守性较低的稳定条件与镇定条件。

[0008] 本发明提供一种前件不匹配的TSFMB时滞系统控制方法,包括步骤:

[0009] S1.基于TS模糊模型TSFMB建立时滞系统的自治模型;

[0010] S2.设计与所述自治模型前件不匹配的模糊控制器模型;

[0011] S3.根据所述自治模型与所述模糊控制器模型获取时滞系统的全局动态模型;

[0012] S4.利用李雅普诺夫函数方法构建线性矩阵不等式,确定所述模糊控制器的参数及所述全局动态模型的镇定条件;其中,

[0013] 所述前件不匹配指的是所述自治模型与所述模糊控制器模型的模糊规则前件、隶属度函数、模糊规则总数均不同。

[0014] 优选地,所述时滞系统为常时滞系统或分布时滞系统。

[0015] 优选地,所述自治模型由公式1确定:

$$[0016] \quad \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^p w_i (A_i x(t) + A_{1i} x(t-h) + A_{2i} \int_{t-h}^t x(s) ds) \quad \text{公式 1}$$

[0017] 其中, $x(t) \in \mathbb{R}^n$, 是状态向量, $i=1, 2, \dots, p$; p 是正整数, 为自治模型模糊规则总数; w_i 是自治模型标准化的隶属度函数; A_i, A_{1i}, A_{2i} 是已知的系统矩阵; h 为时滞。

[0018] 优选地,所述控制器模型由公式2确定:

$$[0019] \quad u(t) = \sum_{j=1}^c m_j K_j x(t) \quad \text{公式 2}$$

[0020] 其中, $u(t)$ 是控制量; $j=1, 2, \dots, c$; c 是正整数, 为控制器模型模糊规则总数; m_j 是控制器模型标准化的隶属度函数; K_j 为第 j 条规则的反馈增益矩阵。

[0021] 优选地,所述全局动态模型由公式3确定:

$$[0022] \quad \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^c w_i m_j (G_{ij} x(t) + A_{1i} x(t-h) + A_{2i} \int_{t-h}^t x(s) ds) \quad \text{公式 3}$$

[0023] 其中, $G_{ij} = A_i + B_i K_j$, B_i 是输入矩阵。

[0024] 优选地,所述方法还包括:利用李雅普诺夫函数方法构建线性矩阵不等式,确定所述自治模型的稳定条件。

[0025] 优选地,所述自治模型的稳定条件由公式4获得:

$$[0026] \quad \Phi_i = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} + \Phi_3 + \Phi_{4i} & \sqrt{h}N_1 & \sqrt{h}N_2 & \sqrt{h}N_3 \\ * & -R & 0 & 0 \\ * & * & -3R & 0 \\ * & * & * & -5R \end{bmatrix} < 0 \quad \text{公式 4}$$

[0027] 其中, $R \in \mathbb{R}^{n \times n} > 0$; $N_1, N_2, N_3 \in \mathbb{R}^{4n \times n}$; $\Phi_{1i} = \text{Sym}\{\Delta_4^T P \Delta_{5i}\} + e_1^T Q e_1 - e_2^T Q e_2 + h \Gamma_i^T R \Gamma_i^T$;

$\Phi_3 = \text{Sym}\{N_1 \Delta_1 + N_2 \Delta_2 + N_3 \Delta_3\}$; $\Phi_{4i} = T_i - F_i + \sum_{r=1}^p \bar{h}_r F_r - \sum_{k=1}^p \underline{h}_k T_k$; $\Delta_1 = e_1 - e_2$, $P \in \mathbb{R}^{3n \times 3n} > 0$, Δ_2

$= e_1 + e_2 - 2e_3$, $\Delta_3 = e_1 - e_2 - 6e_3 + 6e_4$, $\Delta_4 = [e_1^T \quad h e_3^T \quad \frac{h^2}{2} e_4^T]^T$, $\text{Sym}(A) = A + A^T$,

$\Delta_{Si} = [\Gamma_i^T \quad e_1^T - e_2^T \quad he_3^T - he_2^T]^T, e_0 = [0_{n \times (\theta-1)n} \quad I_n \quad 0_{n \times (4-\theta)n}]$, $\theta = 1, 2, 3, 4, Q \in R^{n \times n} > 0, F_i > 0$, $T_i > 0, \Gamma_i = [A_i \quad A_{1i} \quad hA_{2i} \quad 0]$; $\bar{h}_i \geq h_i$, 是 h_i 的上界; $\underline{h}_i \leq h_i$, 是 h_i 的下界; $h_i = w_i$ 。

[0028] 优选地,所述自治模型的稳定条件由公式5获得:

$$[0029] \quad \Phi_i = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} + \Phi_3 & \sqrt{h}N_1 & \sqrt{h}N_2 & \sqrt{h}N_3 \\ * & -R & 0 & 0 \\ * & * & -3R & 0 \\ * & * & * & -5R \end{bmatrix} < 0 \quad \text{公式 5}$$

[0030] 其中, $R \in R^{n \times n} > 0; N_1, N_2, N_3 \in R^{4n \times n}; \Phi_{1i} = \text{Sym}\{\Delta_4^T P \Delta_{Si}\} + e_1^T Q e_1 - e_2^T Q e_2 + h \Gamma_i^T R \Gamma_i$; $\Phi_3 = \text{Sym}\{N_1 \Delta_1 + N_2 \Delta_2 + N_3 \Delta_3\}$; $\Delta_1 = e_1 - e_2$, $\Delta_2 = e_1 + e_2 - 2e_3$, $\Delta_3 = e_1 - e_2 - 6e_3 + 6e_4$, $\Delta_4 = [e_1^T \quad he_3^T \quad \frac{h^2}{2}e_4^T]^T$, $\text{Sym}(A) = A + A^T$, $P \in R^{3n \times 3n} > 0, \Delta_{Si} = [\Gamma_i^T \quad e_1^T - e_2^T \quad he_3^T - he_2^T]^T, e_0 = [0_{n \times (\theta-1)n} \quad I_n \quad 0_{n \times (4-\theta)n}]$, $\theta = 1, 2, 3, 4, Q \in R^{n \times n} > 0, \Gamma_i = [A_i \quad A_{1i} \quad hA_{2i} \quad 0]$ 。

[0031] 优选地,所述模糊控制器的参数及所述全局动态模型的镇定条件由公式6确定:

$$[0032] \quad \Phi_{ij} = \begin{bmatrix} \Pi_1 & \sqrt{h}\bar{N}_1 & \sqrt{h}\bar{N}_2 & \sqrt{h}\bar{N}_3 & \sqrt{h}\bar{\Gamma}_{ij}^T \\ * & -\bar{R} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -3\bar{R} & 0 & 0 \\ * & * & * & -5\bar{R} & 0 \\ * & * & * & * & \frac{1}{\delta^2}\bar{R} - \frac{2}{\delta}X \end{bmatrix} < 0 \quad \text{公式 6}$$

[0033] 其中, $\bar{R} \in R^{n \times n} > 0$, $\bar{N}_1, \bar{N}_2, \bar{N}_3 \in R^{4n \times n}$, δ 为常数, $\Pi_1 = \bar{\Phi}_{1ij} + \bar{\Phi}_3 + \bar{\Phi}_{4ij}$, $\bar{\Gamma}_{ij} = [G_{ij} \quad A_{1i} \quad hA_{2i} \quad 0]$, $\bar{\Phi}_{1ij} = \text{Sym}\{\Delta_4^T \bar{P} \bar{\Delta}_{Sij}\} + e_1^T \bar{Q} e_1 - e_2^T \bar{Q} e_2$, $\bar{P} \in R^{3n \times 3n} > 0$, $\bar{Q} \in R^{n \times n} > 0$, $\bar{\Phi}_3 = \text{Sym}\{\bar{N}_1 \Delta_1 + \bar{N}_2 \Delta_2 + \bar{N}_3 \Delta_3\}$, $\bar{\Phi}_{4ij} = \bar{T}_{ij} - \bar{F}_{ij} + \sum_{r=1}^p \sum_{s=1}^c \bar{h}_{rs} \bar{F}_{rs} - \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^c \bar{h}_{kl} \bar{T}_{kl}$, $\bar{F}_{ij} > 0, \bar{T}_{ij} > 0$, $\bar{\Delta}_{Sij} = [\bar{\Gamma}_{ij}^T \quad X(e_1^T - e_2^T) \quad X(he_3^T - he_2^T)]^T$, $X \in R^{n \times n} > 0$; $\bar{h}_{ij} \geq h_{ij}$, 是 h_{ij} 的上界; $\underline{h}_{ij} \leq h_{ij}$, 是 h_{ij} 的下界; $h_{ij} = w_{imj}$ 。

[0034] 优选地,所述模糊控制器的参数及所述全局动态模型的镇定条件由公式7确定:

$$[0035] \quad \Phi_{ij} \leq \begin{bmatrix} \bar{\Phi}_{1ij} + \bar{\Phi}_3 & \sqrt{h}\bar{N}_1 & \sqrt{h}\bar{N}_2 & \sqrt{h}\bar{N}_3 & \sqrt{h}\bar{\Gamma}_{ij}^T \\ * & -\bar{R} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -3\bar{R} & 0 & 0 \\ * & * & * & -5\bar{R} & 0 \\ * & * & * & * & \frac{1}{\delta^2}\bar{R} - \frac{2}{\delta}X \end{bmatrix} < 0 \quad \text{公式 7}$$

[0036] 其中, $\bar{R} \in R^{n \times n} > 0$, $\bar{N}_1, \bar{N}_2, \bar{N}_3 \in R^{4n \times n}$, δ 为常数, $\bar{\Gamma}_{ij} = [G_{ij} \quad A_{1i} \quad hA_{2i} \quad 0]$, $\bar{\Phi}_{1ij} = \text{Sym}\{\Delta_4^T \bar{P} \bar{\Delta}_{Sij}\} + e_1^T \bar{Q} e_1 - e_2^T \bar{Q} e_2$, $\bar{\Phi}_3 = \text{Sym}\{\bar{N}_1 \Delta_1 + \bar{N}_2 \Delta_2 + \bar{N}_3 \Delta_3\}$, $\bar{Q} \in R^{n \times n} > 0$,

[0037] $\bar{P} \in R^{3n \times 3n} > 0$, $\bar{\Delta}_{Sij} = [\bar{\Gamma}_{ij}^T \quad X(e_1^T - e_2^T) \quad X(he_3^T - he_2^T)]^T$, $X \in R^{n \times n} > 0$ 。

[0038] 由以上技术方案可知,本发明提供的前件不匹配的TSFMB时滞系统控制方法,将前件不匹配的控制器设计方法应用在时滞系统之中,减小了传统的PDC方法模糊控制器设计的复杂度,大大提升了方案的工程应用价值。同时,本发明提出了新的积分不等式以获得系统的稳定条件与镇定条件,比已知的其他积分不等式保守性更小。

附图说明

[0039] 图1是本发明的前件不匹配的TSFMB时滞系统控制方法示意图。

具体实施方式

[0040] 为使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下参照附图并举出优选实施例,对本发明进一步详细说明。然而,需要说明的是,说明书中列出的许多细节仅仅是为了使读者对本发明的一个或多个方面有一个透彻的理解,即便没有这些特定的细节也可以实现本发明的这些方面。

[0041] 本发明的发明人考虑到,在推导系统的稳定条件与镇定条件时,现有技术的保守性较高。同时,设计模糊控制器通常采用的PDC方法要求模糊控制器与模糊模型具有相同的模糊规则前件,而在工程实践中只有极少数系统满足这个要求,因此,PDC方法在应用中存在较大局限性。此外,现有技术中鲜有将前件不匹配的控制器设计方法应用在分布时滞系统的研究。

[0042] 基于以上考虑,本发明的发明人将前件不匹配的控制器设计方法应用在分布时滞系统、常时滞系统中,并提出了新的积分不等式获得保守性较小的稳定条件与镇定条件。

[0043] 下面详细介绍本发明的技术方案。

[0044] 图1示出了本发明的前件不匹配的TSFMB时滞系统控制方法,如图1所示,上述方法按照如下步骤执行:

[0045] 步骤S1,基于TS模糊模型TSFMB建立时滞系统的自治模型。

[0046] 在本发明优选实施例中,上述时滞系统为常时滞系统或分布时滞系统。

[0047] 假定描述非线性被控对象的模糊规则数为 p ,则第 i 条规则可以被描述为如下形式:

[0048] 规则 i :如果 $v_1(x(t))$ 为 M_1^i , $v_2(x(t))$ 是 M_2^i , \dots , $v_\Lambda(x(t))$ 是 M_Λ^i ,则有

$$[0049] \quad \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + A_{1i} x(t-h) + A_{2i} \int_{t-h}^t x(s) ds + B_i u(t) \\ x(t) = \phi(t), t \in [-h, 0], \end{cases}$$

[0050] 其中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 是状态向量; $v_\partial(x(t))$ ($\partial=1,2,\dots,\Lambda$)是前件变量函数, Λ 是正整数; M_∂^i ($\partial=1,2,\dots,\Lambda$)是第 i 条规则的模糊项,其中 $i=1,2,\dots,p$; A_i, A_{1i}, A_{2i} 已知的系统矩阵; B_i 是输入矩阵; $u(t) \in \mathbb{R}^{m \times 1}$;时滞 h 是满足 $h \in [h_{\min}, h_{\max}]$ 的常数;初始条件 $\phi(t)$ 是连续的向量函数。

[0051] 上式中的 $A_{1i}x(t-h)$ 项为常时滞项, $A_{2i} \int_{t-h}^t x(s) ds$ 项为分布时滞项,本发明可通过设置不同的系统矩阵使控制方法适用于常时滞系统或分布时滞系统。

[0052] 模糊系统的全局模型可以表示为:

$$[0053] \quad \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^p w_i(x(t))(A_i x(t) + A_{li} x(t-h) + A_{2i} \int_{t-h}^t x(s)ds + B_i u(t))$$

[0054] 其中, $\sum_{i=1}^p w_i(x(t)) = 1, w_i(x(t)) \in [0,1], i=1,2,\dots,p$

$$[0055] \quad \omega_i(x(t)) = \frac{\prod_{\partial=1}^{\Lambda} \mu_{M_{\partial}^i}(v_{\partial}(x(t)))}{\sum_{k=1}^p \prod_{\partial=1}^{\Lambda} \mu_{M_{\partial}^k}(v_{\partial}(x(t)))}$$

[0056] $\omega_i(x(t))$ 是标准化的隶属度函数, $\mu_{M_{\partial}^i}(v_{\partial}(x(t)))$ 是对应于模糊项 M_{∂}^i 的隶属度函数的级数, 其中 $i=1,2,\dots,p, \partial=1,2,\dots,\Lambda$ 。

[0057] 自治模型则为:

$$[0058] \quad \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^p w_i(A_i x(t) + A_{li} x(t-h) + A_{2i} \int_{t-h}^t x(s)ds) \quad \text{公式 1}$$

[0059] 步骤S2, 设计与自治模型前件不匹配的模糊控制器模型。

[0060] 下面将设计一个具有c条规则的模糊控制器来控制自治模型, 其中, 第j条规则可以表示为如下形式:

[0061] 规则j: 如果 $s_1(x(t))$ 为 N_1^j , $s_2(x(t))$ 为 N_2^j , \dots , $s_{\Xi}(x(t))$ 为 N_{Ξ}^j , 则有

[0062] $u(t) = K_j x(t)$, $j=1,2,\dots,c$

[0063] 其中, $s_{\beta}(x(t))$ 为前件变量函数, 其中 $\beta=1,2,\dots,\Xi, \Xi$ 为正整数, N_{β}^j 是对应于函数 $s_{\beta}(x(t))$ 的模糊项, K_j 为第j条规则的反馈增益矩阵。

[0064] 类似的, 模糊控制器可以表示为

$$[0065] \quad u(t) = \sum_{j=1}^c m_j K_j x(t) \quad \text{公式 2}$$

[0066] 其中,

$$[0067] \quad \sum_{j=1}^c m_j(x(t)) = 1, m_j(x(t)) \in [0,1], j=1,2,\dots,c$$

$$[0068] \quad m_j(x(t)) = \frac{\prod_{\beta=1}^{\Xi} \mu_{N_{\beta}^j}(s_{\beta}(x(t)))}{\sum_{k=1}^c \prod_{\beta=1}^{\Xi} \mu_{N_{\beta}^k}(s_{\beta}(x(t)))}$$

[0069] $m_j(x(t))$ 是标准化的隶属度函数, $\mu_{N_{\beta}^j}(s_{\beta}(x(t)))$ 是对应于模糊项 N_{β}^j 的隶属度函数的级数, 其中 $\beta=1,2,\dots,\Xi, j=1,2,\dots,c$ 。

[0070] 需要指出的是, 上述控制器模型与自治模型的模糊前件不匹配, 即: 二者的模糊项、隶属度函数、模糊规则总数均不同。在设计模糊控制器时, 现有技术通常采用PDC方法, PDC方法可以使稳定性分析更加容易, 但是系统的T-S模糊模型必须是确定的, 因为设计模糊控制器时需要T-S模糊模型的隶属度信息。此外, 当模糊模型的隶属度函数很复杂或者规则数目很大时, 如果采用PDC方法, 模糊控制器也只能选择复杂的隶属度函数和很大的规则数目, 这样将会增大模糊控制器设计的复杂度, 增大实际应用中实现的代价。本发明采用与PDC不同的前件不匹配方法, 可以避免上述缺陷, 提高控制器设计的灵活性及系统响应速

度。

[0071] 步骤S3,根据自治模型与模糊控制器模型获取时滞系统的全局动态模型。

[0072] 通过自治模型与控制器模型,可得到下面的全局动态模型:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^c w_i m_j (G_{ij} x(t) + A_{1i} x(t-h) + A_{2i} \int_{t-h}^t x(s) ds) \quad \text{公式 3}$$

[0074] 其中, $G_{ij} = A_i + B_i K_j$ 。

[0075] 在本发明优选实施例中,通过下面的步骤确定自治模型的稳定条件。

[0076] 为了简化复杂的矩阵和向量表达式,在此给出如下的符号说明:

[0077] $e_0 = [0_{n \times (\theta-1)n} \quad I_n \quad 0_{n \times (4-\theta)n}]$, $\theta = 1, 2, 3, 4$,

[0078] $\eta_1(t) = \int_{t-h}^t x(s) ds$, $\eta_2(t) = \int_{t-h}^t \int_{t-h}^s x(u) du ds$,

[0079] $\varepsilon(t) = [x^T(t) \quad \eta_1^T(t) \quad \eta_2^T(t)]^T$,

[0080] $\zeta(t) = [x^T(t) \quad x^T(t-h) \quad \frac{1}{h} \eta_1^T(t) \quad \frac{2}{h^2} \eta_2^T(t)]^T$,

[0081] $\Gamma_i = [A_i \quad A_{1i} \quad h A_{2i} \quad 0]$,

[0082] 此外,为了简化计算,在后面的部分当中,将 $\omega_i(x(t))$ 表示为 ω_i , $m_j(x(t))$ 表示为 m_j 。

[0083] 为了完成之后的证明,在此给出如下的重要的引理:

[0084] 引理1:假定 x 是可微函数; $[\alpha, \beta] \rightarrow \mathbb{R}^n$, 对于 $N_1, N_2, N_3 \in \mathbb{R}^{4n \times n}$, $R \in \mathbb{R}^{n \times n} > 0$, 则下面的不等式成立:

$$-\int_{\alpha}^{\beta} \dot{x}^T(s) R \dot{x}(s) ds \leq \xi^T \Omega \xi,$$

[0086] 其中,

$$\begin{aligned} \Omega = & \tau(N_1 R^{-1} N_1^T + \frac{1}{3} N_2 R^{-1} N_2^T + \frac{1}{5} N_3 R^{-1} N_3^T) \\ & + \text{Sym}\{N_1 \Delta_1 + N_2 \Delta_2 + N_3 \Delta_3\}, \end{aligned}$$

[0088] $\Delta_1 = e_1 - e_2$, $\Delta_2 = e_1 + e_2 - 2e_3$,

[0089] $\Delta_3 = e_1 - e_2 - 6e_3 + 6e_4$,

[0090] $\xi = [x^T(\beta) \quad x^T(\alpha) \quad \frac{1}{\tau} \int_{\alpha}^{\beta} x^T(s) ds \quad \frac{1}{\tau^2} \int_{\alpha}^{\beta} \int_{\alpha}^s x^T(s) du ds]^T$,

[0091] $\tau = \beta - \alpha$.

[0092] 引理2:对于给定的矩阵 $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ * & S_{22} \end{bmatrix}$, 下面的三个等式是等价的:

[0093] $S < 0$

[0094] $S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$

[0095] $S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0$

[0096] 本发明通过下面的方法确定自治系统的稳定条件:如果存在矩阵 $P \in \mathbb{R}^{3n \times 3n} > 0$, $R \in \mathbb{R}^{n \times n} > 0$, $Q \in \mathbb{R}^{n \times n} > 0$, $F_i > 0$, $T_i > 0$ ($i = 1, 2, \dots, p$) 满足如下的矩阵不等式,则自治系统时渐进稳定的:

$$[0097] \quad \Phi_i = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} + \Phi_3 + \Phi_{4i} & \sqrt{h}N_1 & \sqrt{h}N_2 & \sqrt{h}N_3 \\ * & -R & 0 & 0 \\ * & * & -3R & 0 \\ * & * & * & -5R \end{bmatrix} < 0, \quad \text{公式 4}$$

[0098] 其中,

$$[0099] \quad \Phi_{1i} = \text{Sym}\{\Delta_4^T P \Delta_{5i}\} + e_1^T Q e_1 - e_2^T Q e_2 + h \Gamma_i^T R \Gamma_i^T,$$

$$[0100] \quad \Delta_4 = [e_1^T \quad h e_3^T \quad \frac{h^2}{2} e_4^T]^T,$$

$$[0101] \quad P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ * & P_{22} & P_{23} \\ * & * & P_{33} \end{bmatrix},$$

$$[0102] \quad \Delta_{5i} = [\Gamma_i^T \quad e_1^T - e_2^T \quad h e_3^T - h e_2^T]^T,$$

$$[0103] \quad \Phi_{4i} = T_i - F_i + \sum_{r=1}^p \bar{h}_r F_r - \sum_{k=1}^p h_k T_k,$$

$$[0104] \quad \Phi_3 = \text{Sym}\{N_1 \Delta_1 + N_2 \Delta_2 + N_3 \Delta_3\}, i = 1, 2, \dots, p$$

[0105] 下面给出证明:

[0106] 为了分析TSFMB自治系统的稳定性,选取如下的Lyapunov函数

$$[0107] \quad V(t) = \varepsilon^T(t) P \varepsilon(t) + \int_{t-h}^t x^T(s) Q x(s) ds + \int_{-h}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{x}^T(s) R \dot{x}(s) ds d\theta$$

[0108] 则V(t)的时间导数为

$$[0109] \quad \dot{V}(t) = \sum_{i=1}^p w_i (\zeta^T(t) \Phi_{1i} \zeta(t) - \int_{t-h}^t \dot{x}^T(s) R \dot{x}(s) ds)$$

[0110] 由引理1,可以得到:

$$[0111] \quad \begin{aligned} & - \int_{t-h}^t \dot{x}^T(s) R \dot{x}(s) ds \\ & \leq \zeta^T(t) [(h N_1 R^{-1} N_1^T + \frac{h}{3} N_2 R^{-1} N_2^T + \frac{h}{5} N_3 R^{-1} N_3^T) \\ & \quad + \text{Sym}\{N_1 \Delta_1 + N_2 \Delta_2 + N_3 \Delta_3\}] \zeta(t) \\ & = \zeta^T(t) (\Phi_2 + \Phi_3) \zeta(t) \end{aligned}$$

[0112] 其中, $\Phi_2 = h N_1 R^{-1} N_1^T + \frac{h}{3} N_2 R^{-1} N_2^T + \frac{h}{5} N_3 R^{-1} N_3^T$ 。由引理2,可以得到:

$$[0113] \quad \dot{V}(t) \leq \sum_{i=1}^p w_i \zeta^T(t) (\Phi_{1i} + \Phi_2 + \Phi_3) \zeta(t) = \sum_{i=1}^p \omega_i \zeta^T(t) \Phi_i \zeta(t)$$

[0114] 其中 $\Phi_i = \Phi_{1i} + \Phi_2 + \Phi_3, i = 1, 2, \dots, p$ 。

[0115] 进一步的,通过如下的代数运算,可以得到

$$\begin{aligned}
& \dot{V}(t) \\
&= \sum_{i=1}^p w_i \zeta^T(t) \Phi_i \zeta(t) \\
&\leq \sum_{i=1}^p w_i \zeta^T(t) \Phi_i \zeta(t) + \sum_{i=1}^p (\bar{w}_i - w_i) \zeta^T(t) F_i \zeta(t) \\
&\quad + \sum_{i=1}^p (w_i - \underline{w}_i) \zeta^T(t) T_i \zeta(t) \\
[0116] \quad &= \sum_{i=1}^p w_i \zeta^T(t) (\Phi_i - F_i + T_i) \zeta(t) + \sum_{i=1}^p \bar{w}_i \zeta^T(t) F_i \zeta(t) \\
&\quad - \sum_{i=1}^p \underline{w}_i \zeta^T(t) T_i \zeta(t) \\
&= \sum_{i=1}^p w_i \zeta^T(t) (\Phi_i - F_i + T_i + \sum_{r=1}^p \bar{w}_r F_r - \sum_{k=1}^p \underline{w}_k T_k) \zeta(t)
\end{aligned}$$

[0117] 其中, \underline{w}_i 是 w_i 的下界, \bar{w}_i 是 w_i 的上界, F_i 和 T_i 是半正定矩阵。因此如果:

$$[0118] \quad \Phi_i - F_i + T_i + \sum_{r=1}^p \bar{w}_r F_r - \sum_{k=1}^p \underline{w}_k T_k < 0 \quad (19)$$

[0119] 那么可以得到 $\dot{V}(t) < 0$ 。同时应用引理2 (Schur Complement), 可以得到式 (19) 等价于公式4, 即如果公式4成立, 自治系统是渐进稳定的。

[0120] 为了减小计算复杂性, 假定 N_1, N_2, N_3 满足如下的关系:

$$[0121] \quad N_1 = \frac{1}{h} [-R \quad R \quad 0 \quad 0]^T,$$

$$[0122] \quad N_2 = \frac{3}{h} [-R \quad -R \quad 2R \quad 0]^T,$$

$$[0123] \quad N_3 = \frac{5}{h} [-R \quad R \quad 6R \quad -6R]^T.$$

[0124] 这样就完成了证明。

[0125] 需要说明的是, 为了避免混乱, 公式4中以 h_i 代替 w_i , $\bar{h}_i \geq h_i$, 是 h_i 的上界; $\underline{h}_i \leq h_i$, 是 h_i 的下界。另外, 公式中的 $\bar{h}_r, \underline{h}_k$ 中的下标取值均从1到p, 下标只表示取值序号, 实际含义与i相同。另外, 函数 $\text{Sym}(A) = A + A^T$ 。

[0126] 通过公式4, 本发明获得自治系统的稳定条件, 与现有技术其它方法相比保守性较小。

[0127] 由于公式4中包含了隶属度函数的信息, 因此该稳定性条件具有较小的保守性。但是, 下边的与隶属度函数无关的稳定性条件在自治系统的稳定性分析问题也是有效的。

[0128] 对于给定的常数 $h \in [h_{\min}, h_{\max}]$, 自治系统是渐进稳定的, 如果存在矩阵 $P \in \mathbb{R}^{3n \times 3n} > 0, R \in \mathbb{R}^{n \times n} > 0, Q \in \mathbb{R}^{n \times n} > 0$, 满足如下的矩阵不等式:

$$[0129] \quad \Phi_i = \Phi_{1i} + \Phi_2 + \Phi_3 = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} + \Phi_3 & \sqrt{h}N_1 & \sqrt{h}N_2 & \sqrt{h}N_3 \\ * & -R & 0 & 0 \\ * & * & -3R & 0 \\ * & * & * & -5R \end{bmatrix} < 0, \quad \text{公式 5}$$

[0130] 尽管公式5比公式4更保守,但是公式4中的稳定性条件不仅涉及隶属度函数 w_i ,同时也包括变量 F_i, T_i ,这些信息会增加实现的代价。而公式5正好相反,不要求有关隶属度函数的任何信息,并且可以满足大多情况下的工程要求,因此在实际应用当中会更加适用。

[0131] 公式4、5可以被用来分析自治系统的稳定性,但是并不能被用来设计模糊控制器。

[0132] 步骤S4,利用李雅普诺夫函数方法构建线性矩阵不等式,通过以下方法确定模糊控制器的参数及全局动态模型的镇定条件。

[0133] 对于给定的常数 $h \in [h_{\min}, h_{\max}]$ 、 $\delta, t_i (i=2, 3, \dots, 6)$,全局动态模型(公式3)是渐进稳定的,如果存在矩阵 $\bar{R} \in R^{n \times n} > 0, \bar{Q} \in R^{n \times n} > 0, \bar{F}_{ij} \in R^{4n \times 4n} \geq 0, \bar{T}_{ij} \in R^{4n \times 4n} \geq 0, \bar{K}_j \in R^{m \times n} > 0, X \in R^{n \times n} > 0, i=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, c$ 满足如下的矩阵不等式,反馈增益矩阵可以被表示为 $K_j = \bar{K}_j X^{-1}$:

$$[0134] \quad \Phi_{ij} = \begin{bmatrix} \Pi_1 & \sqrt{h}\bar{N}_1 & \sqrt{h}\bar{N}_2 & \sqrt{h}\bar{N}_3 & \sqrt{h}\bar{\Gamma}_{ij}^T \\ * & -\bar{R} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -3\bar{R} & 0 & 0 \\ * & * & * & -5\bar{R} & 0 \\ * & * & * & * & \frac{1}{\delta^2}\bar{R} - \frac{2}{\delta}X \end{bmatrix} < 0 \quad \text{公式 6}$$

[0135] 其中, $\Pi_1 = \bar{\Phi}_{1ij} + \bar{\Phi}_3 + \bar{\Phi}_{4ij}, i=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, c$ 。

[0136] 下面给出证明:

[0137] 和公式4的证明过程相似,选取同样的Lyapunov函数,用 $G_{ij} = A_i + B_i K_j$ 替代 A_i ,因为现在的研究对象是全局动态模型,则:

$$[0138] \quad \dot{V}(t) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^c w_i m_j (\zeta^T(t) \Phi_{1i} \zeta(t) - \int_{t-h}^t \dot{x}^T(s) R \dot{x}(s) ds)$$

[0139] 进一步的可以得到

$$[0140] \quad \dot{V}(t) \leq \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^c w_i m_j \zeta^T(t) (\Phi_{1ij} + \Phi_2 + \Phi_3) \zeta(t)$$

[0141] 而 $\zeta^T(t) \Phi_{1ij} \zeta(t), \zeta^T(t) \Phi_2 \zeta(t), \zeta^T(t) \Phi_3 \zeta(t)$ 也可以被表示为:

$$[0142] \quad \begin{aligned} \zeta^T(t) \Phi_{1ij} \zeta(t) &= \zeta^T(t) [\text{Sym}\{\Delta_4^T P \Delta_{5ij}\} + e_1^T Q e_1 - e_2^T Q e_2 + h \Gamma_{ij}^T R \Gamma_{ij}] \zeta(t) \\ &= \zeta^T(t) \text{Sym}\{M_{1ij}\} \zeta(t) + \zeta^T(t) \text{Sym}\{M_2\} \zeta(t) \\ &\quad + \zeta^T(t) \text{Sym}\{M_{3ij}\} \zeta(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \zeta^T(t) \Phi_2 \zeta(t) = \zeta^T(t) [hN_1 R^{-1} N_1^T + \frac{h}{3} N_2 R^{-1} N_2^T \\
& + \frac{h}{5} N_3 R^{-1} N_3^T] \zeta(t) \\
& = \zeta^T(t) M_4 \zeta(t) + \zeta^T(t) M_5 \zeta(t) + \zeta^T(t) M_6 \zeta(t)
\end{aligned}
\tag{0143}$$

$$\begin{aligned}
& \zeta^T(t) \Phi_3 \zeta(t) = \zeta^T(t) [\text{Sym}\{N_1 \Delta_1 + N_2 \Delta_2 + N_3 \Delta_3\}] \zeta(t) \\
& = \zeta^T(t) M_7 \zeta(t) + \zeta^T(t) M_8 \zeta(t) + \zeta^T(t) M_9 \zeta(t)
\end{aligned}
\tag{0144}$$

[0145] 其中,

$$M_{1ij} = \begin{bmatrix} P_{11} G_{ij} + P_{12} & P_{11} A_{1i} - P_{12} - h P_{13} & h P_{11} A_{2i} + P_{13} h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ h P_{12}^T G_{ij} + h P_{22} & h P_{12}^T A_{1i} - h P_{22} - h^2 P_{23} & h^2 P_{12}^T + h^2 P_{23} & 0 \\ \frac{h^2}{2} P_{13}^T G_{ij} + \frac{h^2}{2} P_{23}^T & \frac{h^2}{2} P_{13}^T A_{1i} - \frac{h^2}{2} P_{23}^T - \frac{h^3}{2} P_{33} & \frac{h^2}{2} P_{13}^T A_{2i} + \frac{h^2}{2} P_{33} & 0 \end{bmatrix}
\tag{0146}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} Q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\tag{0147}$$

$$M_{3ij} = \begin{bmatrix} G_{ij}^T R G_{ij} & G_{ij}^T R A_{1i} & G_{ij}^T R (h A_{2i}) & 0 \\ A_{1i}^T R G_{ij} & A_{1i}^T R A_{1i} & A_{1i}^T R (h A_{2i}) & 0 \\ h A_{2i}^T R G_{ij} & h A_{2i}^T R A_{1i} & h A_{2i}^T R (h A_{2i}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},
\tag{0148}$$

$$M_4 = \frac{1}{h} \begin{bmatrix} R & -R & 0 & 0 \\ -R & R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\tag{0149}$$

$$M_5 = \frac{3}{h} \begin{bmatrix} R & R & -2R & 0 \\ R & R & -2R & 0 \\ -2R & -2R & 4R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\tag{0150}$$

$$M_6 = \frac{5}{h} \begin{bmatrix} R & -R & -6R & 6R \\ -R & R & 6R & -6R \\ -6R & 6R & 36R & -36R \\ 6R & -6R & -36R & 36R \end{bmatrix}
\tag{0151}$$

$$M_7 = \text{Sym} \left\{ \frac{1}{h} \begin{bmatrix} -R & R & 0 & 0 \\ R & -R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right\}
\tag{0152}$$

$$[0153] \quad M_8 = \text{Sym} \left\{ \frac{3}{h} \begin{bmatrix} -R & -R & 2R & 0 \\ -R & -R & 2R & 0 \\ 2R & 2R & -4R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right\}$$

$$[0154] \quad M_9 = \text{Sym} \left\{ \frac{5}{h} \begin{bmatrix} -R & R & 6R & -6R \\ R & -R & -6R & 6R \\ 6R & -6R & -36R & 36R \\ -6R & 6R & 36R & -36R \end{bmatrix} \right\}$$

[0155] 因此可以得到:

$$\zeta^T(t)(\Phi_{1ij} + \Phi_2 + \Phi_3)\zeta(t)$$

$$[0156] \quad = \zeta^T(t)(M_{1ij} + M_2 + M_{3ij} + M_4 + M_5 + M_6 + M_7 + M_8 + M_9)\zeta(t)$$

[0157] 即 $\dot{V}(t) < 0$, 如果:

$$[0158] \quad M_{1ij} + M_2 + M_{3ij} + M_4 + M_5 + M_6 + M_7 + M_8 + M_9 < 0 \quad (29)$$

[0159] 定义一些新的变量:

$$[0160] \quad P_{12} = t_2 P_{11}, P_{13} = t_3 P_{11}, P_{22} = t_4 P_{11}, P_{23} = t_5 P_{11}, P_{33} = t_6 P_{11}$$

[0161] 将式 (29) 的左右两边分布乘以 $\text{diag} [X \ X \ X \ X]$ 及其转置, 并定义如下的一些新的变量:

$$[0162] \quad X = P_{11}^{-1}, \bar{R} = XRX, \bar{Q} = XQX,$$

$$[0163] \quad \bar{K}_j = K_j X, \bar{G}_{ij} = A_i X + B_i \bar{K}_j,$$

$$[0164] \quad \bar{A}_{1i} = A_{1i} X, \bar{A}_{2i} = A_{2i} X, \bar{B}_i = B_i X,$$

$$[0165] \quad \bar{N}_1 = \frac{1}{h} [-\bar{R} \quad \bar{R} \quad 0 \quad 0]^T,$$

$$[0166] \quad \bar{N}_2 = \frac{3}{h} [-\bar{R} \quad -\bar{R} \quad 2\bar{R} \quad 0]^T,$$

$$[0167] \quad \bar{N}_3 = \frac{5}{h} [-\bar{R} \quad \bar{R} \quad 6\bar{R} \quad -6\bar{R}]^T,$$

$$[0168] \quad \bar{\Gamma}_{ij} = [\bar{G}_{ij} \quad \bar{A}_{1i} \quad h\bar{A}_{2i} \quad 0]$$

$$[0169] \quad \bar{\Delta}_{sij} = [\bar{\Gamma}_{ij}^T \quad X(e_1^T - e_2^T) \quad X(he_3^T - he_2^T)]^T,$$

[0170] 可以得到:

$$[0171] \quad \text{Sym} \{ \Delta_4^T P \bar{\Delta}_{sij} \} + e_1^T \bar{Q} e_1 - e_2^T \bar{Q} e_2 + h \bar{\Gamma}_{ij}^T \bar{R} \bar{\Gamma}_{ij} \\ + h \bar{N}_1 \bar{R}^{-1} \bar{N}_1^T + \frac{h}{3} \bar{N}_2 \bar{R}^{-1} \bar{N}_2^T + \frac{h}{5} \bar{N}_3 \bar{R}^{-1} \bar{N}_3^T \\ + \text{Sym} \{ \bar{N}_1 \Delta_1 + \bar{N}_2 \Delta_2 + \bar{N}_3 \Delta_3 \} + h \bar{\Gamma}_{ij}^T \bar{R} \bar{\Gamma}_{ij} < 0$$

[0172] 即:

$$\begin{aligned}
[0173] \quad \dot{V}(t) &\leq \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^c w_i m_j \zeta^T(t) \bar{\Phi}_{ij} \zeta(t) \\
&= \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^c w_i m_j \zeta^T(t) (\bar{\Phi}_{1ij} + \bar{\Phi}_2 + \bar{\Phi}_3) \zeta(t) + h \bar{\Gamma}_{ij}^T \bar{R} \bar{\Gamma}_{ij} < 0
\end{aligned}$$

[0174] 其中,

$$[0175] \quad \bar{\Phi}_{1ij} = \text{Sym}\{\Delta_4^T \bar{P} \Delta_{5ij}\} + e_1^T \bar{Q} e_1 - e_2^T \bar{Q} e_2,$$

$$[0176] \quad \bar{\Phi}_2 = h \bar{N}_1 \bar{R}^{-1} \bar{N}_1^T + \frac{h}{3} \bar{N}_2 \bar{R}^{-1} \bar{N}_2^T + \frac{h}{5} \bar{N}_3 \bar{R}^{-1} \bar{N}_3^T,$$

$$[0177] \quad \bar{\Phi}_3 = \text{Sym}\{\bar{N}_1 \Delta_1 + \bar{N}_2 \Delta_2 + \bar{N}_3 \Delta_3\},$$

$$[0178] \quad i = 1, 2, \dots, p, j = 1, 2, \dots, c,$$

[0179] 将 $\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^c w_i m_j$ 表示为 $\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^c h_{ij}$, 并且通过应用和公式4证明过程中相似的数值运算,

我们可以得到:

$$\begin{aligned}
\dot{V}(t) &\leq \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^c h_{ij} \zeta^T(t) \bar{\Phi}_{ij} \zeta(t) \\
[0180] \quad &\leq \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^c h_{ij} \zeta^T(t) (\bar{\Phi}_{ij} - \bar{F}_{ij} + \bar{T}_{ij} + \sum_{r=1}^p \sum_{s=1}^c \bar{h}_{rs} \bar{F}_{rs} \\
&\quad - \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^c \bar{h}_{kl} \bar{T}_{kl}) \zeta(t)
\end{aligned}$$

[0181] 其中 $\bar{h}_{ij} \geq h_{ij}$, 是 h_{ij} 的上界; $\underline{h}_{ij} \leq h_{ij}$, 是 h_{ij} 的下界, $\bar{F}_{ij} \geq 0, \bar{T}_{ij} \geq 0$, 因此如果:

$$\begin{aligned}
[0182] \quad &\bar{\Phi}_{1ij} + \bar{\Phi}_2 + \bar{\Phi}_3 + h \bar{\Gamma}_{ij}^T \bar{R} \bar{\Gamma}_{ij} - \bar{F}_{ij} + \bar{T}_{ij} + \sum_{r=1}^p \sum_{s=1}^c \bar{h}_{rs} \bar{F}_{rs} \\
&- \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^c \bar{h}_{kl} \bar{T}_{kl} < 0
\end{aligned} \tag{35}$$

[0183] 我们可以得到 $\dot{V}(t) < 0$, 即具有分布时滞的全局动态模型是渐进稳定的. 应用引理2 (Schur Complement), 不等式 (35) 可以被表示为

$$[0184] \quad \Phi_{ij} = \begin{bmatrix} \Pi_1 & \sqrt{h} \bar{N}_1 & \sqrt{h} \bar{N}_2 & \sqrt{h} \bar{N}_3 & \sqrt{h} \bar{\Gamma}_{ij}^T \\ * & -\bar{R} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -3\bar{R} & 0 & 0 \\ * & * & * & -5\bar{R} & 0 \\ * & * & * & * & -\bar{R}^{-1} \end{bmatrix} < 0 \tag{36}$$

[0185] 其中,

$$[0186] \quad \Pi_1 = \bar{\Phi}_{1ij} + \bar{\Phi}_3 + \bar{\Phi}_{4ij},$$

$$[0187] \quad \bar{\Phi}_{4ij} = -\bar{F}_{ij} + \bar{T}_{ij} + \sum_{r=1}^p \sum_{s=1}^c \bar{h}_{rs} \bar{F}_{rs} - \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^c \bar{h}_{kl} \bar{T}_{kl},$$

$$[0188] \quad i = 1, 2, \dots, p, j = 1, 2, \dots, c.$$

[0189] 此外, $R > 0$, 即 R 为正定对称矩阵, 因此对于任意标量 δ , 有下式成立

$$[0190] \quad (\sigma R^{-1} - X) R (\sigma R^{-1} - X) > 0$$

[0191] 上式也可以写为:

$$[0192] \quad -R^{-1} < -\frac{2}{\delta} X + \frac{1}{\delta^2} \bar{R} \quad (38)$$

[0193] 把式 (38) 代入式 (36), 可以得到 LMI 公式 6, 即完成了证明。

[0194] 公式 6 介绍了一种隶属度函数相关的模糊控制器设计方法, 因为镇定条件中包含隶属度函数的信息, 并且前件不完全匹配的模糊控制理论给控制器的设计提供了更多的自由度, 所以由此得出的镇定条件具有较小的保守性。但是将公式 6 简化为公式 7 时, 对于模糊控制器的设计仍然是有效的。

[0195] 对于给定的常数 $h \in [h_{\min}, h_{\max}]$, $\delta, t_i (i=2, 3, \dots, 6)$, 全局动态模型是渐进稳定的, 如果存在矩阵 $\bar{R} \in R^{n \times n} > 0, \bar{Q} \in R^{n \times n} > 0, \bar{K}_j \in R^{m \times n} > 0, X \in R^{n \times n} > 0, i=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, c$ 满足如下的矩阵不等式, 并且状态反馈增益矩阵可以被表示为 $K_j = \bar{K}_j X^{-1}$:

$$[0196] \quad \begin{aligned} & \Phi_{ij} = \Phi_{1ij} + \Phi_2 + \Phi_3 + h \Gamma_{ij}^T R \Gamma_{ij} \\ & \leq \begin{bmatrix} \Phi_{1ij} + \Phi_3 & \sqrt{h} \bar{N}_1 & \sqrt{h} \bar{N}_2 & \sqrt{h} \bar{N}_3 & \sqrt{h} \bar{\Gamma}_{ij}^T \\ * & -\bar{R} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -3\bar{R} & 0 & 0 \\ * & * & * & -5\bar{R} & 0 \\ * & * & * & * & \frac{1}{\delta^2} \bar{R} - \frac{2}{\delta} X \end{bmatrix} < 0 \quad \text{公式 7} \end{aligned}$$

[0197] 与公式 5 相似, 虽然公式 6 比公式 7 保守性更小, 但是公式 7 不包含隶属度函数的信息, 也不涉及变量 $\bar{F}_{ij}, \bar{T}_{ij}$, 因此更加适用于实际应用。

[0198] 根据本发明的前件不匹配的 TSFMB 时滞系统控制方法, 能够大大减小传统 PDC 方法模糊控制器设计的复杂度, 并可通过新的积分不等式获得保守性较小的稳定条件与镇定条件。

[0199] 本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例方法中的全部或部分步骤是可以通程序来指令相关的硬件来完成, 该程序可以存储于一计算机可读取存储介质中, 如: ROM/RAM、磁碟、光盘等。

[0200] 以上所述仅是本发明的优选实施方式, 应当指出, 对于本技术领域的普通技术人员来说, 在不脱离本发明原理的前提下, 还可以作出若干改进和润饰, 这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

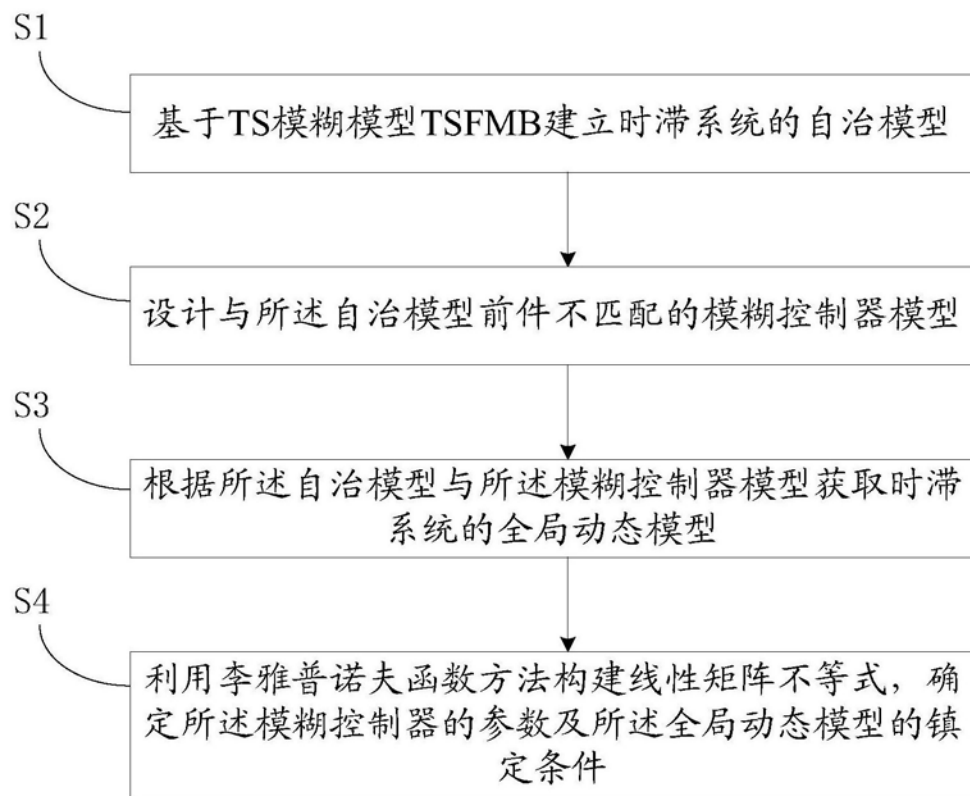


图1