

具有部分不可测量状态的非线性系统自适应跟踪控制^{*}

李博博¹, 王银河¹, 彭 义¹, 王小溪²

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广州 510006; 2. 北京起重运输机械设计研究院有限公司, 北京 100007)

摘要:针对具有部分不可测量状态的非线性系统自适应跟踪控制问题,提出了由相互耦合的 2 个子系统即可测量状态子系统与不可测量状态子系统组合而成的新非线性系统的数学模型;然后针对系统中存在的未知非线性函数与不确定参数进行估计处理后得到未知量的估计状态信息;最后仅利用系统的可测量状态及其它已知有界信息量和估计状态信息合成自适应控制器,由 Lyapunov 稳定性理论证得,在所提的自适应控制器作用下可测量状态与不可测量状态均能渐近跟踪各自的参考目标。给出 1 个仿真实例验证所提出的控制方法的有效性。结果显示,在未引入状态观测器估计不可测量状态条件下,仅利用可测量状态信息合成系统自适应控制器与基于状态观测器设计的控制器相比,新提出的控制器控制性能更优。

关键词:非线性系统;可测量状态;不可测量状态;自适应跟踪控制

中图分类号:TP273

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2024)05-0106-09

在非线性控制理论研究中,稳定和跟踪一直是学者们最为关注的 2 个问题^[1]。无论是研究系统的稳定或者跟踪,都需要应用到受控系统状态信息^[2],但在实际工程应用中,受传感器技术、系统控制设计要求或者经济成本等因素的影响,例如无速度传感器的永磁同步电机驱动系统^[3-4]、无张力传感器的薄带卷绕系统^[5-6]、无位置传感器的无刷直流电机^[7-8]等受控系统中可能存在部分无法直接测量的状态变量,而且在系统控制器的合成中也无法直接利用不可测量状态。再者,系统在运行中某些传感器或执行器的故障损坏也会导致系统某些状态变量信息的缺失^[9-10]。因此,本文从大系统的角度出发^[11],将非线性系统视为由可测量状态和不可测量状态 2 个子系统组合而成,针对系统中存在部分不可测量状态的条件,本文将借鉴欠驱动控制的思想,利用可测量状态变量信息完成控制器设计,仅对可测量状态子系统施加控制以实现整个受控系统的跟踪控制。

鉴于对具有部分不可测量状态的非线性系统稳定与跟踪的研究需要,针对系统的不可测量状态进行状态观测器设计^[2,12-19]亦或者仅针对全可测量状态进行控制研究^[20-21],目前已经涌现出许多行之有效的理论成果。它们的基本原理都是利用观测器的状态对系统的不可测量状态进行近似替代,进而利用可测量状态和观测器状态合成系统控制器。根据观测器状态的维数不同,非线性系统观测器可分为全维观测器^[12-14]和降维观测器 2 种^[2,15-19]。全维观测器的维数与系统本身维数一致,针对系统的全部状态变量进行状态估计。降维观测器是指观测器的维数低于系统本身的状态维数,只针对未能直接输出的部分系统状态变量进行估计。与全维状态观测器相比,降维观测器的构造需要的积分器更少,也使得受控系统结构更加简单。Liu 等人^[13]在研究具有全状态约束的非线性系统的输出反馈跟踪控制时,针对系统状态均为不可被测量的全约束状态,构造自适应全维观测器来对全约束状态进行估计处理,并运用切线势垒 Lyapunov 函数使所有状态都处于时变边界之内,所有的信号均为有界信号,设计系统自适应控制器以确保系统稳定运行,仿真结果也验证了该研究控制策略的有效性。Chen 等人^[14]在研究含有未知扰动和不可测状态变量的非线性系统时,提出一种基于逆步技术的自适应神经输出反馈控制方法,针对系统中存在的未知干扰和不可测量状态,利用径向基函数神经网络的逼近功能设计状态观测器和扰动观测器,并以此构造了系统自适应控制器;仿真结果表明,该控制方法既保证了系统的闭环稳定,

^{*} 收稿日期:2023-04-17 修回日期:2023-08-20 网络出版时间:2024-11-14T16:33

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 61673120);国家重点实验室开放基金项目(No. 202109242);广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金项目(No. 2024A1515011652)

第一作者简介:李博博,男,研究方向为非线性系统稳定性分析与控制,E-mail:boboli_gdut@sina.cn;通信作者:彭义,男,实验师,E-mail:pengyi@gdut.edu.cn

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.n.20241114.1033.002

也使得非线性系统含有在未知时滞、外部未知干扰和不可测量状态的条件下有很好的稳定效果和跟踪效果。Han 等人^[18]在研究含有部分未知状态的非线性系统的故障估计与容错控制问题时,针对系统中存在的不可测量状态,利用降维观测器去估计未知信息,使用估计状态替代不可测量状态,提出了一种非线性容错控制技术,实现了系统的控制稳定;仿真结果也验证了该控制方法的有效性。Li 等人^[19]在研究具有不可用测量状态的非线性系统的跟踪控制时,利用降维观测器来估计系统的不可测量状态,并根据已知的估计状态信息提出了一种自适应输出反馈控制策略,消除了因状态不可测对系统稳定带来的影响,达到了系统闭环稳定的理想效果,最后通过仿真实验证明了该文控制策略的有效性。

以上针对系统存在的不可测量状态来进行观测器设计的文献极大地丰富了对含有不可测量状态的非线性系统控制策略。但值得注意的是,以上文献在针对不可测量状态处理上均采用观测器设计,利用观测器状态近似替代不可测量状态,因而在系统模型上忽略了可测量状态和不可测量状态之间的关联性与不确定性。而现实的复杂非线性系统中这 2 个状态具有很强的关联关系和不确定性^[22-23],且在工程应用中,受外部环境干扰、建模精度等因素的影响,系统模型中会存在不确定性及可测量状态与不可测量状态之间的耦合作用;若忽略系统中的非线性不确定性及耦合作用,可能会影响整个系统的控制效果,甚至会导致控制器失去控制作用。因此,在系统中存在不可测量状态且在未引入状态观测器的条件下,考虑可测量状态与不可测量状态之间的耦合,有效地估计系统中存在的耦合不确定性,仅利用可测量状态为系统设计自适应控制器,使可测量状态与不可测量状态完成各自的跟踪任务是一个极具挑战和研究价值的问题。

受上述文献研究的启发,本文主要研究具有部分不可测量状态和不确定性非线性组合系统的跟踪控制。本文提出的新的非线性系统动力学模型的主要优势与创新之处如下:1) 将动态系统中的状态分为可测量状态与不可测量状态 2 部分,且 2 部分相互耦合。2) 考虑到非线性系统中存在的不确定性,有效估计了系统中的不确定性。3) 对不可测量状态不进行观测器设计,仅利用可测量状态为系统设计自适应控制器,控制器结构中不包含不可测量状态及它的估计状态信息;当可测量状态渐进跟踪上参考目标时,不可测量状态也同步跟踪上辅助参考目标,优势既体现在保证受控系统维度的稳定上,又体现在简化控制器的结构和减少实际应用中的经济投入。

1 模型描述

含有部分不可测量状态非线性组合系统的动力学方程表示如下:

$$\dot{x}_1 = A_1(x_1, t)x_1 + \tau B_1(x_1, t)x_2 + f(x) + C\bar{u}, \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = A_2(x_1, t)x_2 + B_2(x_1, t)x_1, \quad (2)$$

其中: $x_1 = x_1(t) \in \mathbb{R}^{n_1}$ 是子系统(1)的状态向量, $x_2 = x_2(t) \in \mathbb{R}^{n_2}$ 是子系统(2)的状态向量, 函数矩阵 $A_1 = A_1(x_1, t) \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_1}$, $A_2 = A_2(x_1, t) \in \mathbb{R}^{n_2 \times n_2}$, $B_1 = B_1(x_1, t) \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2}$, $B_2 = B_2(x_1, t) \in \mathbb{R}^{n_2 \times n_1}$, 控制输入 $\bar{u} \in \mathbb{R}^{n_1}$, 增益矩阵 $C \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_1}$, $f(x)$ 是系统的未知向量函数, t 表示时间, τ 为系统的不确定参数。

假设 1 系统状态 x_1 是可测量状态, 状态 x_2 是不可测量状态。

假设 2 系统矩阵 $A_1(x_1, t)$, $A_2(x_1, t)$, $B_1(x_1, t)$, $B_2(x_1, t)$ 均为关于 x_1 的函数矩阵, 且均已知有界, 增益矩阵 C 已知可逆, 不确定参数 $|\tau| \leq h$, h 为正实数。

假设 3 存在矩阵 $K \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_1}$ 使得矩阵 $(A_1 + K)$ 是 Hurwitz 矩阵, 矩阵 A_2 也是 Hurwitz 矩阵。

本文将非线性系统视为由 2 个子系统组成, 将系统(1)视为可测量状态子系统, 将系统(2)视为不可测量状态子系统。

注 1 根据假设 3 中观点: 矩阵 A_2 是 Hurwitz 矩阵, 故任意给定的正定矩阵 $Q_2 \in \mathbb{R}^{n_2 \times n_2}$, 则存在正定对称矩阵 $W_2 \in \mathbb{R}^{n_2 \times n_2}$ 使得如下 Lyapunov 方程成立:

$$A_2^T W_2 + W_2 A_2 = -Q_2, \quad (3)$$

故任意给定的正定矩阵 $Q_1 \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_1}$, 则也存在正定对称矩阵 $W_1 \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_1}$ 使得如下 Lyapunov 方程成立:

$$(A_1 + K)^T W_1 + W_1 (A_1 + K) = -Q_1. \quad (4)$$

对于以上 2 个 Lyapunov 方程(3)和(4), 矩阵 K 和正定矩阵 W_2 均可以通过解线性矩阵不等式:

$$A_1^T W_1 + W_1 A_1 + G_1 + G_1^T < 0 (G_1 = W_1 K)$$

和 $A_2^T W_2 + W_2 A_2 < 0$ 来求解。

注 2 1) 在假设 2 下考虑多机器人系统^[24], 第 i 个机器人动力学模型为 $M_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i) + G_i(q_i) + F_i(\dot{q}_i) = \tau_i$, 其中: q_i 和 $\dot{q}_i$ 分别是姿态角和角速度, 均为可测量状态, $M_i(q_i)$ 和 $C_i(q_i, \dot{q}_i)$ 是系统的函数矩阵且均是已知的, τ_i 是向量。此外, 在一阶倒立摆线性化模型、四旋翼飞行器系统模型以及多机器人系统模型中均存在可逆增益矩阵。

2) 在假设 3 中, 鉴于式(2)由 $A_2(x_1, t)x_2$ 和 $B_2(x_1, t)x_1$ 这 2 部分组成, 根据假设 1、2 可知 $B_2(x_1, t)x_1$ 是有界的, 若 $A_2(x_1, t)$ 是 Hurwitz 矩阵, 则可以保证不可测量状态 x_2 是有界的, 这与实际的工程背景相吻合。例如, 无张力传感器的卷绕系统^[25]中系统薄带的张力是不可测量的, 但取值却满足大于 0 N 而不超过 30 N。

3) 假设 2 中不确定参数 $|\tau| \leq h$, 与上述一致, 系统状态 x_1 是可测量的, 不确定参数处于合理的界内也更符合实际的物理背景, 确保了模型的稳定性与可靠性。在观测器设计文章中, 假设 3 与假设 2 中不确定参数 $|\tau| \leq h$, h 为正实数也是很常见的假设条件^[26]。

对于子系统(1), 给定可微有界向量函数 $x_1^* = x_1^*(t)$ 是系统(1)的跟踪参考目标; 设计可微有界辅助参考目标 $x_2^* = x_2^*(t)$ 是子系统(2)的跟踪参考目标。定义 2 个子系统误差向量:

$$e_1 = e_1(t) = x_1(t) - x_1^*(t), e_2(t) = x_2(t) - x_2^*(t)。$$

假设 4 对于系统中的未知向量函数 $f(x)$, 应满足条件: $\theta(x_1, t) \in \mathbf{R}^{n_1}$ 为正值函数, $\|f(x)\| \leq \theta(x_1, t)$ 。

注 3 对于系统中的不确定参数 τ , 定义它的估计值为 $\tilde{\tau} = \tilde{\tau}(t)$, 定义估计误差 $\bar{\tau} = \tau - \tilde{\tau}$ 。

控制目标 针对非线性组合系统(1)和(2), $x_1^* = x_1^*(t)$ 和 $x_2^* = x_2^*(t)$ 分别是系统(1)和(2)的跟踪参考目标, 设计自适应控制器 $\bar{u}$ 及不确定参数的自适应律 $\tilde{\tau}$, 实现对非线性组合系统的跟踪控制, 误差向量

$$e_1(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0, e_2(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0$$

成立。

2 控制器设计

本文给定 2 个微分有界的追踪参考目标 $x_1^* = x_1^*(t) \in \mathbf{R}^{n_1}$ 和 $x_2^* = x_2^*(t) \in \mathbf{R}^{n_2}$, 针对受控子系统(1)、(2)和给定的参考目标, 存在 2 个误差向量: $e_1 = e_1(t) = x_1(t) - x_1^*(t)$ 和 $e_2(t) = x_2(t) - x_2^*(t)$ 。

为了上述控制目标的实现针对不可测量状态子系统(2)的辅助参考目标 x_2^* 以及可测量状态子系统(1)构造的控制器和不确定参数自适应律 $\tilde{\tau}$ 的形式分别如下:

$$\dot{x}_2^* = B_2 x_1 + A_2 x_2^*, \quad (5)$$

$$\dot{\tilde{\tau}} = \alpha e_1^T W_1 B_1 x_2^*, \quad (6)$$

$$\bar{u} = C^{-1}[\dot{x}_1^* + x_1 - (A_1 + K)x_1^* - \tilde{\tau}B_1 x_2^* - w], \quad (7)$$

$$w = \begin{cases} \theta(x_1, t)\Omega, & x_1 \neq x_1^* \\ 0, & x_1 = x_1^* \end{cases}, \Omega = \frac{W_1 e_1}{\|W_1 e_1\|}, \quad (8)$$

其中: 自适应律增益参数 α 为可调整实数。

注 4 考虑到非线性系统(1)和(2), 式(6)~(8)是本文提出的控制策略以确保控制目标的实现。控制器 $\bar{u}$ 由 3 部分组成, 分别是可测量状态关联项 $C^{-1}Kx_1$ 、参考目标关联项 $C^{-1}[\dot{x}_1^* - (A_1 + K)x_1^* - \tilde{\tau}B_1 x_2^*]$ 和鲁棒项 $-C^{-1}w$, 其中 w 用于消除系统中未知向量函数 $f(x)$ 对系统的影响。由控制器的组成可知, 本文所提出的自适应控制器不包含不可测量状态 x_2 及它的估计状态, 这说明该控制器 $\bar{u}$ 对不可测量状态 x_2 有一定的鲁棒性。在仿真部分, 将本文提出的控制器与文献[18]中由估计状态组成的控制器对比, 仿真结果表明本文提出的自适应控制器控制性能更优。

考虑到可测量状态子系统误差向量为:

$$e_1 = x_1 - x_1^*, \quad (9)$$

则误差 $e_1(t)$ 关于时间导数 $\dot{e}_1(t)$ 为:

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_1^* = A_1 x_1 + \tau B_1 x_2 + f(x) + C\bar{u} - \dot{x}_1^* =$$

$$\begin{aligned}
& (\mathbf{A}_1 + \mathbf{K})(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_1^*) + \tau \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_2 + f(\mathbf{x}) + \mathbf{C}\bar{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{x}}_1^* - \mathbf{K}\mathbf{x}_1 + (\mathbf{A}_1 + \mathbf{K})\mathbf{x}_1^* = \\
& (\mathbf{A}_1 + \mathbf{K})\mathbf{e}_1 + \tau \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_2 + f(\mathbf{x}) + \mathbf{C}\bar{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{x}}_1^* - \mathbf{K}\mathbf{x}_1 + (\mathbf{A}_1 + \mathbf{K})\mathbf{x}_1^* = \\
& (\mathbf{A}_1 + \mathbf{K})\mathbf{e}_1 + \tau \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_2 - \tau \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_2^* + f(\mathbf{x}) + \mathbf{C}\bar{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{x}}_1^* - \mathbf{K}\mathbf{x}_1 + (\mathbf{A}_1 + \mathbf{K})\mathbf{x}_1^* + \tau \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_2^* = \\
& (\mathbf{A}_1 + \mathbf{K})\mathbf{e}_1 + \tau \mathbf{B}_1 \mathbf{e}_2 + f(\mathbf{x}) + \mathbf{C}\bar{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{x}}_1^* - \mathbf{K}\mathbf{x}_1 + (\mathbf{A}_1 + \mathbf{K})\mathbf{x}_1^* + \tau \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_2^* = \\
& (\mathbf{A}_1 + \mathbf{K})\mathbf{e}_1 + \tau \mathbf{B}_1 \mathbf{e}_2 + f(\mathbf{x}) + \mathbf{C}\bar{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{x}}_1^* - \mathbf{K}\mathbf{x}_1 + (\mathbf{A}_1 + \mathbf{K})\mathbf{x}_1^* + \tau \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_2^* - \tilde{\tau} \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_2^* + \tilde{\tau} \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_2^* = \\
& (\mathbf{A}_1 + \mathbf{K})\mathbf{e}_1 + \tau \mathbf{B}_1 \mathbf{e}_2 + f(\mathbf{x}) + \mathbf{C}\bar{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{x}}_1^* - \mathbf{K}\mathbf{x}_1 + (\mathbf{A}_1 + \mathbf{K})\mathbf{x}_1^* + \tau \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_2^* + \tilde{\tau} \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_2^* .
\end{aligned} \tag{10}$$

考虑到不可测量状态子系统跟踪误差为:

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_2^*, \tag{11}$$

则误差 $\mathbf{e}_2(t)$ 关于时间导数 $\dot{\mathbf{e}}_2(t)$ 为:

$$\dot{\mathbf{e}}_2 = \dot{\mathbf{x}}_2 - \dot{\mathbf{x}}_2^* = \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{B}_2 \mathbf{x}_1 - \dot{\mathbf{x}}_2^* = \mathbf{A}_2 (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_2^*) + \mathbf{B}_2 \mathbf{x}_1 + \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_2^* - \dot{\mathbf{x}}_2^* = \mathbf{A}_2 \mathbf{e}_2 + \mathbf{B}_2 \mathbf{x}_1 + \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_2^* - \dot{\mathbf{x}}_2^*. \tag{12}$$

引理 1 关于矩阵 $\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{N}$ 的迹与范数的运算有以下式子成立的:

$$\text{tr}(\mathbf{M}\mathbf{N}) \leq \|\mathbf{M}\| \cdot \|\mathbf{N}\|, \|\mathbf{M}^T\| = \|\mathbf{M}\|, \|\mathbf{M}\mathbf{N}\| \leq \|\mathbf{M}\| \cdot \|\mathbf{N}\|.$$

引理 2 对于任意给定正定矩阵 $\mathbf{U} \in \mathbf{R}^{m \times m}$, 任意给定的列向量 $\mathbf{v} \in \mathbf{R}^m$, 不等式 $\lambda_{\min}(\mathbf{U}) \|\mathbf{v}\|^2 \leq \text{tr}(\mathbf{v}^T \mathbf{U} \mathbf{v})$ 成立, 矩阵 $\mathbf{U}$ 为负定矩阵时, 则 $-\lambda_{\min}(\mathbf{U}) \|\mathbf{v}\|^2 \geq \text{tr}(\mathbf{v}^T \mathbf{U} \mathbf{v})$ 成立。

引理 3 根据杨氏不等式可得, 存在任意非负实数 a 和 b , 若 $p > 1, \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$, 则有 $ab \leq \epsilon a^p + f(\epsilon) b^q$ 成立,

其中 ϵ 任意小而 $f(\epsilon)$ 任意大, $f(\epsilon) = \frac{(p\epsilon)^{-\frac{q}{p}}}{q}$, 则有 $ab \leq \epsilon a^p + \frac{(p\epsilon)^{-\frac{q}{p}}}{q} b^q$ 成立。若取 $p = q = 2$, 即有 $ab \leq \epsilon a^2 + \frac{(2\epsilon)^{-1}}{2} b^2 = \epsilon a^2 + \frac{1}{4} \epsilon^{-1} b^2 \leq \epsilon a^2 + \epsilon^{-1} b^2$ 。

注 5 $\lambda_{\min}(\mathbf{Q}_i)$ 表示矩阵 $\mathbf{Q}_i$ 的最小特征值, 令:

$$c_1 = \lambda_{\min}(\mathbf{Q}_1) - h\eta \|\mathbf{W}_1\| \|\mathbf{B}_1\|, c_2 = \lambda_{\min}(\mathbf{Q}_2) - h\eta^{-1} \|\mathbf{W}_1\| \|\mathbf{B}_1\|,$$

η 为可调正实数。

定理 1 考虑到含部分不可测量状态的非线性组合系统(1)和(2), 若该系统满足假设 2~4, 根据本文提出的控制策略式(6)~(8)和辅助参考目标式(5), 使得 $\|\mathbf{B}_1\| \leq \min\left\{\frac{\lambda_{\min}(\mathbf{Q}_1)}{h\eta \|\mathbf{W}_1\|}, \frac{\eta \lambda_{\min}(\mathbf{Q}_2)}{h \|\mathbf{W}_1\|}\right\}$, 可测量状态 $\mathbf{x}_1(t)$ 能渐进跟踪给定参考目标 $\mathbf{x}_1^*(t)$, 不可测量状态 $\mathbf{x}_2(t)$ 也可以同步渐进跟踪给定参考目标 $\mathbf{x}_2^*(t)$ 。

证明 考虑以下正定函数:

$$V(t) = V_1(\mathbf{e}_1) + V_2(\mathbf{e}_2) + \alpha^{-1} \bar{\tau}^2 = \text{tr}(\mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 \mathbf{e}_1) + \text{tr}(\mathbf{e}_2^T \mathbf{W}_2 \mathbf{e}_2) + \alpha^{-1} \bar{\tau}^2,$$

得 $V(t)$ 关于时间的导数 $\dot{V}(t)$ 如下:

$$\begin{aligned}
\dot{V}(t) &= \dot{V}_1(\mathbf{e}_1) + \dot{V}_2(\mathbf{e}_2) - 2\alpha^{-1} \bar{\tau} \dot{\bar{\tau}} = \text{tr}(\dot{\mathbf{e}}_1^T \mathbf{W}_1 \mathbf{e}_1) + \text{tr}(\mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 \dot{\mathbf{e}}_1) + \text{tr}(\dot{\mathbf{e}}_2^T \mathbf{W}_2 \mathbf{e}_2) + \text{tr}(\mathbf{e}_2^T \mathbf{W}_2 \dot{\mathbf{e}}_2) - 2\text{tr}(\alpha^{-1} \bar{\tau} \dot{\bar{\tau}}) = \\
& \text{tr}\{[(\mathbf{A}_1 + \mathbf{K})\mathbf{e}_1 + \tau \mathbf{B}_1 \mathbf{e}_2 + \tilde{\tau} \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_2^* + f(\mathbf{x}) - \mathbf{w}]^T \mathbf{e}_1 \mathbf{W}_1 + \mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 [(\mathbf{A}_1 + \mathbf{K})\mathbf{e}_1 + \tau \mathbf{B}_1 \mathbf{e}_2 + \tilde{\tau} \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_2^* + f(\mathbf{x}) - \mathbf{w}]\} - \\
& 2\text{tr}(\alpha^{-1} \bar{\tau} \dot{\bar{\tau}}) + \text{tr}[(\mathbf{A}_2 \mathbf{e}_2)^T \mathbf{e}_2 \mathbf{W}_2 + \mathbf{e}_2^T \mathbf{W}_2 (\mathbf{A}_2 \mathbf{e}_2)] = \text{tr}[\mathbf{e}_1^T ((\mathbf{A}_1 + \mathbf{K})^T \mathbf{W}_1 + \mathbf{W}_1 (\mathbf{A}_1 + \mathbf{K})) \mathbf{e}_1] + \\
& \text{tr}[(\tau \mathbf{B}_1 \mathbf{e}_2)^T \mathbf{W}_1 \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 (\tau \mathbf{B}_1 \mathbf{e}_2)] + \text{tr}[(\tilde{\tau} \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_2^*)^T \mathbf{e}_1 \mathbf{W}_1 + \mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 (\tilde{\tau} \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_2^*)] + \\
& \text{tr}[\mathbf{e}_2^T (\mathbf{A}_2^T \mathbf{W}_2 + \mathbf{W}_2 \mathbf{A}_2) \mathbf{e}_2] + \text{tr}[(f(\mathbf{x}) - \mathbf{w})^T \mathbf{W}_1 \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 (f(\mathbf{x}) - \mathbf{w})] - 2\alpha^{-1} \bar{\tau} \dot{\bar{\tau}} = \\
& \text{tr}[\mathbf{e}_1^T (-\mathbf{Q}_1) \mathbf{e}_1] + 2\text{tr}(\tau \mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 \mathbf{B}_1 \mathbf{e}_2) + \text{tr}[\mathbf{e}_2^T (-\mathbf{Q}_2) \mathbf{e}_2] + 2\text{tr}(\mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 \tilde{\tau} \mathbf{B}_1 \mathbf{x}_2^* - \alpha^{-1} \bar{\tau} \dot{\bar{\tau}}) + 2\text{tr}[\mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 (f(\mathbf{x}) - \mathbf{w})] = \\
& \text{tr}[\mathbf{e}_1^T (-\mathbf{Q}_1) \mathbf{e}_1] + 2\text{tr}(\tau \mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 \mathbf{B}_1 \mathbf{e}_2) + \text{tr}[\mathbf{e}_2^T (-\mathbf{Q}_2) \mathbf{e}_2] + 2\text{tr}[\mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 (f(\mathbf{x}) - \mathbf{w})] = \\
& -\text{tr}(\mathbf{e}_1^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{e}_1) - \text{tr}(\mathbf{e}_2^T \mathbf{Q}_2 \mathbf{e}_2) + 2\text{tr}(\tau \mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 \mathbf{B}_1 \mathbf{e}_2) + 2\text{tr}[\mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 (f(\mathbf{x}, t) - \theta(\mathbf{x}_1, t) \boldsymbol{\Omega})] = \\
& -\text{tr}(\mathbf{e}_1^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{e}_1) - \text{tr}(\mathbf{e}_2^T \mathbf{Q}_2 \mathbf{e}_2) + 2\text{tr}(\tau \mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 \mathbf{B}_1 \mathbf{e}_2) + 2\text{tr}\left[\mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 \left(f(\mathbf{x}) - \theta(\mathbf{x}_1, t) \frac{\mathbf{W}_1 \mathbf{e}_1}{\|\mathbf{W}_1 \mathbf{e}_1\|}\right)\right] \leq \\
& -\text{tr}(\mathbf{e}_1^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{e}_1) - \text{tr}(\mathbf{e}_2^T \mathbf{Q}_2 \mathbf{e}_2) + 2\text{tr}(\tau \mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 \mathbf{B}_1 \mathbf{e}_2) + 2\|\mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1\| \cdot [\|f(\mathbf{x}_1, t)\| - \theta(\mathbf{x}_1, t)] \leq
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\operatorname{tr}(\mathbf{e}_1^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{e}_1) - \operatorname{tr}(\mathbf{e}_2^T \mathbf{Q}_2 \mathbf{e}_2) + 2\operatorname{tr}(\tau \mathbf{e}_1^T \mathbf{W}_1 \mathbf{B}_1 \mathbf{e}_2) \leq -\operatorname{tr}(\mathbf{e}_1^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{e}_1) - \operatorname{tr}(\mathbf{e}_2^T \mathbf{Q}_2 \mathbf{e}_2) + 2\|\tau\| \cdot \|\mathbf{e}_1^T\| \cdot \|\mathbf{W}_1 \mathbf{B}_1\| \cdot \|\mathbf{e}_2\| \leq \\
& -\operatorname{tr}(\mathbf{e}_1^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{e}_1) - \operatorname{tr}(\mathbf{e}_2^T \mathbf{Q}_2 \mathbf{e}_2) + 2\|\tau\| \cdot \|\mathbf{W}_1 \mathbf{B}_1\| \cdot [\eta \|\mathbf{e}_1^T\|^2 + \eta^{-1} \|\mathbf{e}_2\|^2] \leq \\
& -\lambda_{\min}(\mathbf{Q}_1) \|\mathbf{e}_1^T\|^2 - \lambda_{\min}(\mathbf{Q}_2) \|\mathbf{e}_2\|^2 + 2\|\tau\| \cdot \|\mathbf{W}_1 \mathbf{B}_1\| \cdot [\eta \|\mathbf{e}_1^T\|^2 + \eta^{-1} \|\mathbf{e}_2\|^2] \leq \\
& -\lambda_{\min}(\mathbf{Q}_1) \|\mathbf{e}_1^T\|^2 - \lambda_{\min}(\mathbf{Q}_2) \|\mathbf{e}_2\|^2 + h \cdot \|\mathbf{W}_1 \mathbf{B}_1\| \cdot [\eta \|\mathbf{e}_1^T\|^2 + \eta^{-1} \|\mathbf{e}_2\|^2] = \\
& -(\lambda_{\min}(\mathbf{Q}_1) - h\eta \cdot \|\mathbf{W}_1 \mathbf{B}_1\|) \|\mathbf{e}_1^T\|^2 - (\lambda_{\min}(\mathbf{Q}_2) - h\eta^{-1} \cdot \|\mathbf{W}_1 \mathbf{B}_1\|) \|\mathbf{e}_2\|^2 \leq c_1 \|\mathbf{e}_1^T\|^2 + c_2 \|\mathbf{e}_2\|^2.
\end{aligned}$$

根据上式可知 $\dot{V}(t)$ 关于误差 $\mathbf{e}_1$ 和 $\mathbf{e}_2$ 是负定的, 所以, 由 Lyapunov 稳定性理论可知, 误差系统式(9)、(11), 以及自适应控制器式(7)和自适应律式(6)是稳定的, 故误差

$$\mathbf{e}_1(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0, \mathbf{e}_2(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0,$$

成立。

证毕

注 6 在运用定理 1 时, 式(5)、(9)~(12)的数值计算在时间和空间上的消耗体现了计算的复杂性。此外, 可测量状态与不可测量状态的维数也提高了计算的复杂性, 因为在 Matlab 仿真中需要利用极小精度和极高的迭代次数才能得到满意的结果, 并且因为差分迭代方法的使用, 在仿真中也需要恰当地平衡步长和精度。

3 仿真与分析

考虑三自由度无人水面船模型^[27]如下:

$$\begin{aligned}
\dot{u} &= -\frac{d_{11}}{m_{11}}u + \frac{m_{22}}{m_{11}}vr + \frac{1}{m_{11}}\tau_u, \\
\dot{v} &= -\frac{d_{22}}{m_{22}}v - \frac{m_{11}}{m_{22}}ur, \\
\dot{r} &= -\frac{d_{33}}{m_{33}}r + \frac{m_{11}-m_{22}}{m_{33}}uv + \frac{1}{m_{33}}\tau_r.
\end{aligned}$$

其中: u 表示水面船的前进速度, r 表示水面船的艏摇角速度, v 表示水面船的横漂速度。系统模型参数 $m_{11} = 0.516 \text{ kg}$, $m_{22} = 14.430 \text{ kg}$, $m_{33} = 0.516 \text{ kg}$, $d_{11} = 12.180 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, $d_{22} = 207.872 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, $d_{33} = 0.451 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, τ_u 表示系统前进控制输入, τ_r 表示偏航控制输入, 水面船系统无横漂控制输入。

仿真中假设三自由度无人水面船模型中前进速度 u 和艏摇角速度 r 是可测量状态, 横漂速度 v 是不可测量状态。因此, 在仿真中的控制目标是针对可测量状态 u 和 r 设计自适应控制器, 对整个系统进行控制, 并保证系统的前进速度 u 、艏摇角速度 r 和横漂速度 v 能各自跟踪上给定参考目标, 选取 $\mathbf{x}_1^*(t) = [\sin(t) \quad \sin(t)]^T$ 和 $\mathbf{x}_2^*(t) = 0.2$ 。考虑到本文的模型与控制目标, 选取可测量状态 $\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_1(t) = [u \quad r]^T$, 不可测量状态 $\mathbf{x}_2 = \mathbf{x}_2(t) = v$, 故三自由度无人水面船的系统模型可以改写为如下形式:

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{d_{11}}{m_{11}} & 0 \\ 0 & -\frac{d_{33}}{m_{33}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ r \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{m_{22}}{m_{11}}vr \\ \frac{m_{11}-m_{22}}{m_{33}}uv \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{m_{11}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_{33}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \tau_u \\ \tau_r \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_2 = \dot{v} = -\frac{d_{22}}{m_{22}}v + \begin{bmatrix} \frac{m_{11}}{m_{22}}r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ r \end{bmatrix}. \quad (14)$$

根据式(1)、(2)、(13)和(14)可得:

$$\begin{aligned}
n_1 &= 2, n_2 = 1, c_1 = 0, \mathbf{B}_1(\mathbf{x}_1, t) = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \mathbf{B}_2(\mathbf{x}_1, t) = \begin{pmatrix} \frac{m_{11}}{m_{22}}r & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{A}_2(\mathbf{x}_1, t) = \begin{pmatrix} -\frac{d_{22}}{m_{22}} \end{pmatrix}, \\
\mathbf{A}_1(\mathbf{x}_1, t) &= \begin{bmatrix} -\frac{d_{11}}{m_{11}} & 0 \\ 0 & -\frac{d_{33}}{m_{33}} \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{u}} = \begin{pmatrix} \tau_u \\ \tau_r \end{pmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_{11}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_{33}} \end{bmatrix}, f(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{m_{22}}{m_{11}}vr \\ \frac{m_{11}-m_{22}}{m_{33}}uv \end{bmatrix},
\end{aligned}$$

子系统(14)无控制输入。

仿真中实验中, 定义系统初始状态 $\mathbf{x}_1(0) = [0 \quad 0]^T$, $\mathbf{x}_2(0) = 0.2$, 取正定矩阵:

$$\mathbf{Q}_1 = 5 \times \begin{bmatrix} \text{rand}(1) & \\ & \text{rand}(1) \end{bmatrix},$$

$\text{rand}(1)$ 表示 $[0,1]$ 间的随机数,根据注释 1 解出 $\mathbf{W}_1$,取正值函数形式为 $\theta(\mathbf{x}_1, t) = \sin^2(\mathbf{x}_1^\top * \mathbf{x}_1)$,取不确定参数初始估计值 $\tilde{\tau}(0) = 0.5$,取自适应律可调增益参数 $\alpha = \text{rand } n(1)$,可调参数 $\eta = 1$,将以上参数信息和参考目标信息代入控制器式(7)和自适应律式(6),验证的矩阵 $\mathbf{B}_1$ 满足定理 1 中不等式 $\|\mathbf{B}_1\| \leq \min\left\{\frac{\lambda_{\min}(\mathbf{Q}_1)}{h\eta\|\mathbf{W}_1\|}, \frac{\eta\lambda_{\min}(\mathbf{Q}_2)}{h\|\mathbf{W}_1\|}\right\}$,

仿真中跟踪误差向量有 $\mathbf{e}_1(t) = \mathbf{x}_1(t) - \mathbf{x}_1^*(t) = \begin{pmatrix} e_{11} \\ e_{12} \end{pmatrix}$, $\mathbf{e}_2(t) = \mathbf{x}_2(t) - \mathbf{x}_2^*(t)$ 。

基于以上系统参数的选取,系统仿真结果见图 1~图 4。

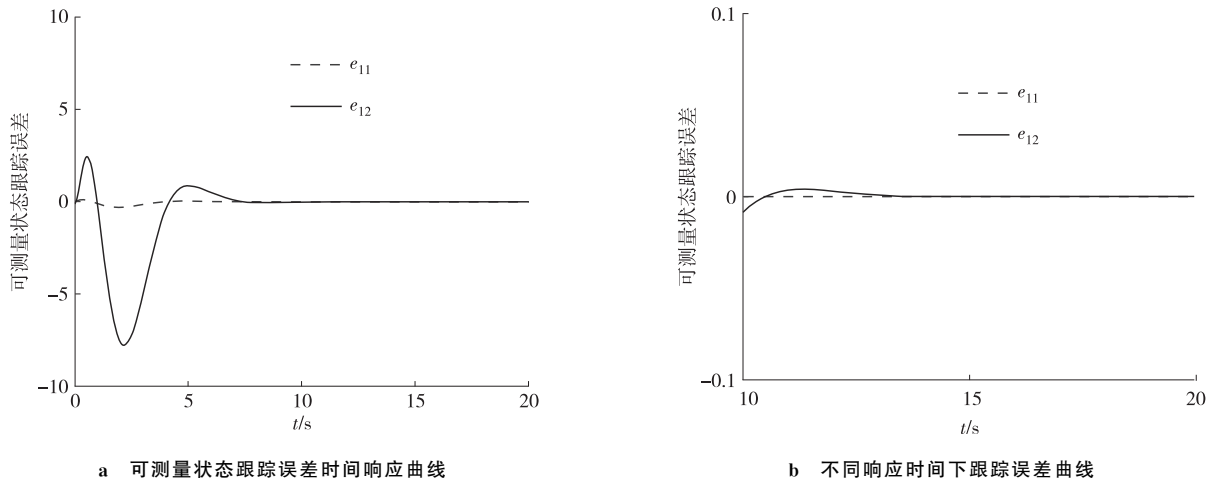


图 1 船前行速度与艏摇角速度跟踪误差时间响应曲线

Fig. 1 The error response curves of forward and yaw angular velocities for USV

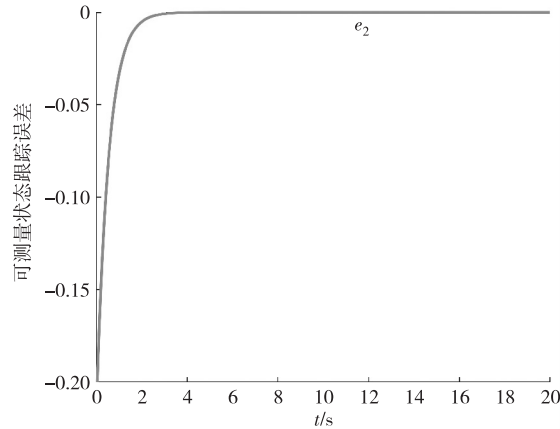


图 2 船横漂速度跟踪误差时间响应曲线

Fig. 2 The error response curve of sway velocity for USV

由图 1~4 可得如下结论:

1) 由图 1 可知,仿真中船在水面的前进速度与艏摇角速度跟踪误差均可以在有限时间内渐近收敛到 0,这表明本文提出的自适应控制器是有效的。

2) 由图 2 可知,仿真中水面船的横漂速度跟踪误差是渐近收敛的,这表明水面船的可测量状态前进速度与艏摇角速度跟踪上各自的参考目标时,水面船的不可测量状态横漂速度也可以跟踪上自己的参考目标。

3) 由图 3 可得,在本文自适应控制器控制作用下,可测量状态前进速度、艏摇角速度的跟踪误差均可以在有限时间内渐近收敛到 0,跟踪上各自的参考目标。在文献[18]的控制器作用下,水面船前进速度、艏摇角速度均无法收敛到 0,即可测量状态前进速度和艏摇角速度不能跟踪。

4) 由图 4 可知,在本文自适应控制器或者文献[18]的控制器作用下不可测量状态横漂速度跟踪误差均可以渐近收敛到 0,但在文献[18]控制器作用下,横漂速度跟踪误差具有较大的超调和较长的调节时间,这表明就控制性能而言,本文控制器的控制性能更优。

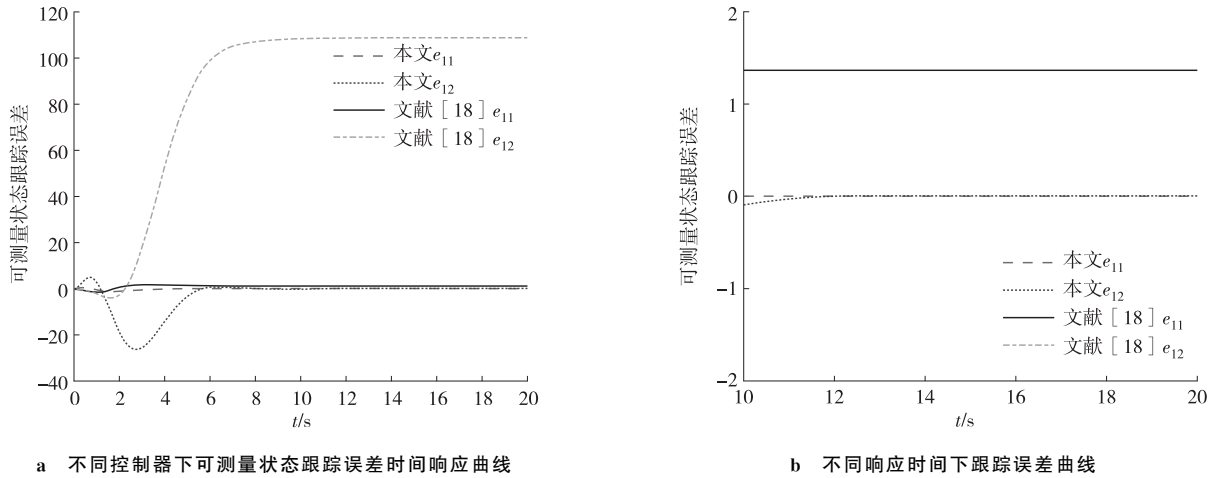


图 3 船前行速度与艏摇角速度在本文和文献[18]控制器下跟踪误差时间响应曲线

Fig. 3 The error response curves of forward and yaw angular velocities here and reference [18] for USV

由图 5 可知,水面船系统的不确定参数的估计值是收敛的,这表明本文提出的自适应控制器和自适应律可以保证未知参数可以被有效估计,并且估计值收敛。

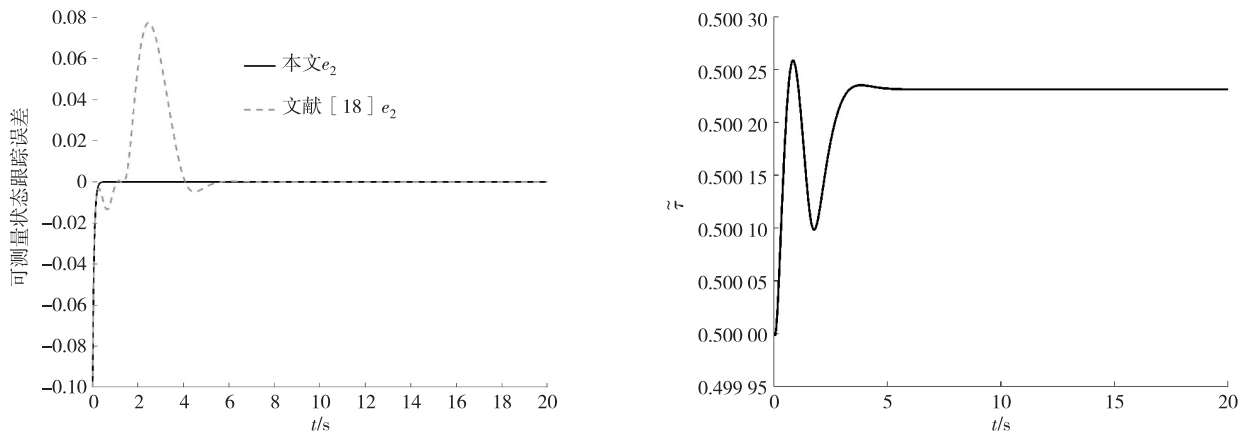


图 4 船横漂速度在本文和文献[18]控制器下跟踪误差时间响应曲线

Fig. 4 The error response curves of sway velocity here and reference for USV

图 5 水面船系统不确定参数估计值的时间响应曲线

Fig. 5 The time response curve of uncertain parameter estimates for USV

综上所述,在本文提出的自适应跟踪控制器作用下,系统可测量状态与不可测量状态都能在有限时间内各自跟踪上自己的参考目标,验证了本文控制策略的有效性。

4 结论

本文提出了一类由可测量状态子系统与不可测量状态子系统组成的非线性系统模型,完成了自适应控制策略设计。与现有文献相比,本文模型的主要优势是针对不可测量状态不进行观测器设计处理,仅利用系统中的可测量状态及其他已知系统信息进行自适应控制器设计,使可测量状态与不可测量状态各自完成跟踪任务,既保持了原系统的维度,又降低了控制器的设计难度。但本文的研究是基于精确的不可测量状态子系统模型,而现实的非线性系统具有较强的非线性与不确定性,因此基于更为复杂的不可测量状态子系统模型下的跟踪控制是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] SKOGESTAD S, POSTLETHWAITE I. Multivariable feedback control: analysis and design[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- [2] MEHTA A J, BANDYOPADHYAY B, INOUE A. Reduced-order observer design for servo system using duality to discrete-time sliding-surface design[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(11): 3793-3800.
- [3] REPECHO V, WAQAR J B, BIEL D, et al. Zero speed sensorless scheme for permanent magnet synchronous machine under decoupled sliding-mode control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2): 1288-1297.
- [4] ZHANG L, BAI J, WU J. Speed sensor-less control system of surface-mounted permanent magnet synchronous motor based on adaptive feedback gain supertwisting sliding mode observer[J]. Journal of Sensors, 2021, 2021: 1-16.
- [5] ANAYI F J, AL IBRAHEEMI M M A. Estimation of rotor position for permanent magnet synchronous motor at standstill using sensorless voltage control scheme[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(3): 1612-1621.
- [6] WANG G L, VALLA M, SOLSONA J. Position sensorless permanent magnet synchronous machine drives: a review[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5830-5842.
- [7] HONG Q, SHI Y Y, CHEN Z. Dynamics modeling and tension control of composites winding system based on ASMC[J]. IEEE Access, 2020, 8: 102795-102810.
- [8] HOU H L, NIAN X H, CHEN J, et al. Decentralized coordinated control of elastic web winding systems without tension sensor[J]. ISA Transactions, 2018, 80: 350-359.
- [9] ZHANG X M, ZHU F L, GUO S H. Actuator fault detection for uncertain systems based on the combination of the interval observer and asymptotical reduced-order observer[J]. International Journal of Control, 2020, 93(11): 2653-2661.
- [10] ZHANG H G, MU Y F, GAO Z Y, et al. Observer-based fault reconstruction and fault-tolerant control for nonlinear systems subject to simultaneous actuator and sensor faults[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2022, 30(8): 2971-2980.
- [11] SANDELL N, VARAIYA P, ATHANS M, et al. Survey of decentralized control methods for large scale systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1978, 23(2): 108-128.
- [12] 吴阳, 张建成. 同时含有未知输入和测量干扰系统全维和降维观测器设计[J]. 自动化学报, 2022, 48(8): 2108-2118.
WU Y, ZHANG J C. Full and reduced-order observer design for systems with both the unknown inputs and measurement disturbances[J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(8): 2108-2118.
- [13] LIU L, CHEN A Q, LIU Y J. Adaptive fuzzy output-feedback control for switched uncertain nonlinear systems with full-state constraints[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 52(8): 7340-7351.
- [14] CHEN M, GE S S. Adaptive neural output feedback control of uncertain nonlinear systems with unknown hysteresis using disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(12): 7706-7716.
- [15] GAO P T, WANG Y H, LIU L Z, et al. Double tracking control for the directed complex dynamic network via the state observer of outgoing links[J]. International Journal of Systems Science, 2023, 54(4): 895-906.
- [16] 刘粉林, 陈兵, 王银河, 等. 一类非线性系统的变结构鲁棒观测器[J]. 控制理论与应用, 2000(2): 303-305.
LIU F L, CHEN B, WANG Y H, et al. Variable structure robust observers for a class of nonlinear systems[J]. Control Theory and Applications, 2000(2): 303-305.
- [17] ZHANG J C, ZHAO X D, ZHU F L, et al. Reduced-order observer design for switched descriptor systems with unknown inputs[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 65(1): 287-294.
- [18] HAN J, LIU X H, WEI X J, et al. A dynamic proportional-integral observer-based nonlinear fault-tolerant controller design for nonlinear system with partially unknown dynamic[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics; Systems, 2022, 52(8): 5092-5104.
- [19] LI D P, HAN H G, QIAO J F. Observer-based adaptive fuzzy control for nonlinear state-constrained systems without involving feasibility conditions[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 52(11): 11724-11733.
- [20] 高子林, 熊江, 潘勇, 等. 基于 T-S 模型的一类非线性系统自适应滑模跟踪控制及仿真[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2016, 33(5): 128-132.
GAO Z L, XIONG J, PAN Y, et al. Adaptive sliding tracking control and simulation for a class of nonlinear systems based on T-S model[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2016, 33(5): 128-132.
- [21] 方园. 含非线性扰动的退化时滞系统的滑模控制[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2012, 29(1): 56-60.
FANG Y. Sliding mode control for time-delay degenerate system with nonlinear perturbations[J]. Journal of Chongqing Normal

- University (Natural Science), 2012, 29(1): 56-60.
- [22] MAHMOUD M S, HASSAN M F, DARWISH M G. Large-scale control systems: theories and techniques[M]. New York: Marcel Decker, Inc, 1985.
- [23] 达庆利, 何见敏. 大系统理论与方法[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989.
- DA Q L, HE J M. Theory and methods on large scale systems[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989.
- [24] WANG Q S, ZHUANG H, DUAN Z S, et al. Robust control of uncertain robotic systems: an adaptive friction compensation approach[J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64(6): 1228-1237.
- [25] HOU H L, NIAN X H, XIONG H Y, et al. Robust decentralized coordinated control of a multimotor web-winding system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(4): 1495-1503.
- [26] TUAN H D, APKARIAN P, NARIKIYO T, et al. Parameterized linear matrix inequality techniques in fuzzy control system design[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2001, 9(2): 324-332.
- [27] YE L Q, ZONG Q. Tracking control of an underactuated ship by modified dynamic inversion[J]. ISA Transactions, 2018, 83: 100-106.

Adaptive Tracking Control for Nonlinear Systems with Partially Unavailable States

LI Bobo¹, WANG Yinhe¹, PENG Yi¹, WANG Xiaoxi²

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006;

2. Beijing Materials Handling Research Institute Co., Ltd, Beijing 100007, China)

Abstract: Considering the adaptive tracking control for nonlinear system with partially unavailable states. Firstly, a new nonlinear system mathematical model is proposed, which is consisted of available states subsystem and unavailable states subsystem. The two subsystems are coupled with each other. Secondly, the unknown nonlinear functions and uncertain parameter are estimated. The estimated information of unknown variables is obtained. Finally, the adaptive controller only is utilized by the available states and other known bounded information. By the Lyapunov stability theory, it is proved that available states and unavailable states can asymptotically track reference goals respectively, with the operation of adaptive controller synthesized. A simulation example is given to verify the effectiveness of control method proposed. Compared with the controller designed based on the state observer, the controller proposed by using only available states has the better control preference without introducing the state observer to estimate unavailable states.

Keywords: nonlinear system; available states; unavailable states; adaptive tracking control

(责任编辑 黄 颖)