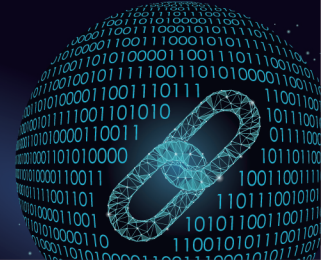




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



带有欺骗攻击的区间二型T-S模糊系统的高效模型预测控制

马江涛, 宋燕

引用本文:

马江涛, 宋燕. 带有欺骗攻击的区间二型T-S模糊系统的高效模型预测控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(7): 2205–2214.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1849>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于变速趋近律的Buck型变换器抗扰动控制

Disturbance rejection control of Buck converters based on variable rate reaching law

控制与决策. 2021, 36(4): 893–900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1073>

基于T-S模糊模型的多时滞非线性网络切换控制系统非脆弱 H_∞ 控制

Non-fragile H_∞ control for multi-delay nonlinear network switching control system based on T-S model

控制与决策. 2021, 36(5): 1087–1094 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1098>

基于向量集逆区间滤波的故障观测器设计

Vector set inversion interval filtering based fault observer design

控制与决策. 2021, 36(12): 2973–2981 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0212>

工业信息物理系统安全风险动态表现分析量化评估模型

Quantitative evaluation model for dynamic performance analysis of security risk in industrial cyber physics systems

控制与决策. 2021, 36(8): 1939–1946 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1479>

参数未知的离散系统Q-学习优化状态估计与控制

Q-learning optimal state estimation and control for discrete systems with unknown parameters

控制与决策. 2020, 35(12): 2889–2897 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0180>

带有欺骗攻击的区间二型 T-S 模糊系统的高效模型预测控制

马江涛¹, 宋燕^{2†}

(1. 上海理工大学理学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 研究欺骗攻击影响下的区间二型 T-S 模糊系统的高效模型预测控制 (efficient model predictive control, EMPC) 问题. 考虑到数据从传感器节点传输到控制器节点受到欺骗攻击的影响, 设计一种 EMPC 框架下基于状态观测器的输出反馈控制器. 首先, 针对能量有界的欺骗攻击, 构建辅助优化问题, 离线求解终端约束集以及满足系统 H_2 安全的固定反馈控制增益和观测器增益; 其次, 引入摄动量提供控制自由度, 离线求解增广系统的不变集, 通过最大化该不变集在原状态空间的投影得到初始可行域; 然后, 在线优化摄动量得到满意的控制律, 确保系统在欺骗攻击影响下的安全性; 最后, 给出所提出的 EMPC 算法理论可行性和系统安全性的证明, 并通过仿真实例验证所提出算法的有效性.

关键词: 高效模型预测控制; 区间二型 T-S 模糊系统; 状态观测器; 欺骗攻击; 初始可行域

中图分类号: O231 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1849

引用格式: 马江涛, 宋燕. 带有欺骗攻击的区间二型 T-S 模糊系统的高效模型预测控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(7): 2205-2214.

Efficient model predictive control for interval type-2 T-S fuzzy systems with deception attacks

MA Jiang-tao¹, SONG Yan^{2†}

(1. College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: This paper investigates the efficient model predictive control (EMPC) problem of a class of interval type-2 T-S fuzzy systems with deception attacks. Considering the influence of deception attacks during the data transmission from the sensor node to the controller node, an observer-based output feedback controller in the framework of EMPC is designed. Firstly, aiming at the energy bounded deception attacks, an auxiliary optimization problem is established. Then, by solving this problem offline, the terminal constraint set and the gains of the corresponding fixed feedback controller and observer that guarantee the system H_2 security are derived. Secondly, perturbations are employed to provide more control freedom, and the invariant set of the augmented system can be designed off-line. In this sense, by maximizing the projection of such an invariant set in the original state space, the initial feasible region is readily obtained. Thirdly, an online optimization problem is put forward to find the desired control law to guarantee system security under deception attacks. Finally, the proof is provided to show the theoretical feasibility of the proposed EMPC algorithm and the security of the closed-loop system. In addition, the effectiveness of the proposed algorithm is verified by a simulation example.

Keywords: efficient model predictive control; interval type-2 T-S fuzzy system; state observer; deception attack; initial feasible region

0 引言

模型预测控制 (model predictive control, MPC)^[1-2], 也称为滚动时域控制, 已成为广泛应用的先进控制方

法之一^[3]. 简单而言, MPC 原理是在每一个采样时刻通过求解一个最优问题得到控制序列, 并将第 1 个控制作用实施于系统, 下一时刻通过新的测量值构建

收稿日期: 2022-10-25; 录用日期: 2023-04-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62073223); 上海市自然科学基金项目 (22ZR1443400).

责任编辑: 牛玉刚.

[†]通讯作者. E-mail: sonya@usst.edu.cn.

优化问题并求解控制器. 这种在线的MPC策略实时解决一个优化问题, 以获得良好的性能, 但由于在线计算负担大, 初始可行域小, 其实用性受到限制. 相反, 对于由离线优化问题决定的离线MPC, 只要系统状态进入预先设计的终端约束集, 控制律将保持不变. 在这种情况下, 离线MPC可以有效地减少在线计算负担, 但通常很难获得满意的系统性能. 因此, 开发更合适的MPC策略以解决初始可行域、在线计算量、控制性能的冲突, 一直是一个很大的挑战.

为了解决上述问题, 文献[4]提出了离线构造椭圆不变集、在线查表的MPC方法以降低在线计算量. 文献[5-6]采用多步控制集的MPC策略, 降低了在线计算量并扩大了初始可行域. 文献[7]提出了一种高效模型预测控制(efficient MPC, EMPC)算法, 该算法在线计算量小, 并引入了额外的自由度来扩大初始可行域. 在这种EMPC的框架下, 一旦系统状态被容许控制输入拖入到终端约束集, 将采用离线求解的固定反馈控制律使系统渐近稳定, 在线只需通过一个简单的优化问题计算附加在固定反馈控制律的摄动量, 同时通过引入这些摄动量可适当地扩大初始可行域.

值得注意的是, 包括上述在内的大多数研究都是基于状态反馈控制的EMPC. 然而, 大多数实际的控制系统状态并不可用, 特别是随着网络化控制系统研究的发展^[8], 控制组件之间的网络连接经常受到如网络丢包^[9]、DoS攻击^[10]、欺骗攻击^[11-12]等影响, 会导致系统状态不可测. 在这种情况下, 基于输出反馈的EMPC研究显得尤为重要. 为了提高EMPC在输出反馈中的适用性, 文献[13]研究了带有加性和乘性不确定性随机系统的EMPC问题, 并设计了基于状态观测器的输出反馈控制方案. 文献[14]采用“离线设计-在线综合”的查表法, 研究了动态输出反馈控制的MPC问题. 除此之外, 基于输出反馈的EMPC或其他改进的MPC方法研究甚少, 特别是对于带有欺骗攻击的网络化系统, 这是本文的研究动机之一.

随着工业的发展, 复杂非线性系统已成为大部分工业的主要研究对象, 上述对线性系统的EMPC研究已不能满足实际工程需求. 近年来, T-S模糊模型通过一组线性子模型与隶属函数相结合来刻画非线性系统, 其中区间二型T-S模糊模型^[15]由于对非线性系统有着更好的描述而被广泛使用. 在EMPC的研究中, 文献[16]讨论了在通信协议下区间二型T-S模糊系统的EMPC问题, 与一型T-S模糊系统的EMPC相比, 有着更好的控制效果. 因此, 本文以区间二型T-S模糊模型刻画的欺骗攻击下的非线性系统为研究对

象, 采用基于状态观测器的输出反馈控制器解决欺骗攻击带来的状态不可测问题, 建立EMPC框架并设计控制算法, 以此来减少在线计算量并扩大初始可行域.

本文的主要贡献为: 1) 首次研究欺骗攻击影响下区间二型T-S模糊系统 H_2 意义下的安全控制问题; 2) 针对数据传输中网络攻击的影响, 设计基于状态观测器的输出反馈模糊EMPC控制方案, 以较好地实现在线计算负担小、初始可行域大与系统性能良好之间的平衡; 3) 对于在线优化问题中的状态不可测问题, 运用锥补线性化(cone complementarity linearization, CCL)等不等式分析技巧构建可行的辅助优化问题, 通过求解该辅助优化问题, 得到满意的控制输入, 并保证了在欺骗攻击下系统的安全性; 4) 给出算法可行性和系统安全性的理论证明, 并通过与在线MPC算法的实验比较说明了本文算法的有效性.

1 问题描述与预备知识

1.1 系统模型

考虑以下区间二型T-S模糊系统:

R_s^i : 如果 $a_1(x_k)$ 属于 F_1^i , $a_2(x_k)$ 属于 F_2^i, \dots ,
且 $a_{n_s}(x_k)$ 属于 $F_{n_s}^i$, 则

$$\begin{cases} x_{k+1} = A^i x_k + B^i u_k, \\ \tilde{y}_k = C^i x_k, \\ z_k = D^i x_k. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x_k \in \mathbb{R}^{n_x}$ (\mathbb{R}^{n_0} 为 n_0 维欧氏空间)和 $u_k \in \mathbb{R}^{n_u}$ 分别表示在 k 时刻的系统状态和控制输入; $\tilde{y}_k \in \mathbb{R}^{n_y}$ 表示测量输出; A^i, B^i, C^i, D^i 表示合适维数的系统参数矩阵, $i \in \mathbb{N}_{N_s+}, \mathbb{N}_{n_0+}(\mathbb{N}_{n_0})$ 为从1到 n_0 的正整数(自然数); R_s^i ($i \in \mathbb{N}_{N_s+}$)表示系统的 N_s 个模糊规则; $a_\iota(x_k)$ ($\iota \in \mathbb{N}_{n_s+}$)表示第 ι 个与系统状态有关的系统前件变量, n_s 表示前件变量的数量, 记 $a(x_k) \triangleq [a_1(x_k), a_2(x_k), \dots, a_{n_s}(x_k)]$; F_ι^i ($i \in \mathbb{N}_{N_s+}, \iota \in \mathbb{N}_{n_s+}$)表示模糊集合.

R_s^i 的激励强度为

$$\rho^i(x_k) \in \Phi^i(x_k) \triangleq [\underline{\rho}^i(x_k), \bar{\rho}^i(x_k)].$$

其中: $\underline{\rho}^i(x_k) = \prod_{\iota=1}^{n_s} \mu_{F_\iota^i}(a_\iota(x_k)) \geq 0$ 和 $\bar{\rho}^i(x_k) = \prod_{\iota=1}^{n_s} \bar{\mu}_{F_\iota^i}(a_\iota(x_k)) \geq 0$ 分别表示下和上隶属度; $\mu_{F_\iota^i}(a_\iota(x_k)) \in [0, 1]$ 和 $\bar{\mu}_{F_\iota^i}(a_\iota(x_k)) \in [0, 1]$ 分别表示模糊集 F_ι^i 中 $a_\iota(x_k)$ 的下和上隶属函数. 很明显

$$\underline{\rho}^i(x_k) \leq \bar{\rho}^i(x_k), \underline{\mu}_{F^i}(a_i(x_k)) \leq \bar{\mu}_{F^i}(a_i(x_k)).$$

由于传感器与控制器之间的网络连接通常会遭到网络攻击,在式(1)中,测量输出 \tilde{y}_k 的数据时常受到破坏. 本文中,用

$$y_k = \tilde{y}_k + \sigma_k \nu_k \quad (2)$$

表示受到欺骗攻击后的输出变量,也即控制器接收到的实际输出变量. 其中 $\nu_k \triangleq -\tilde{y}_k + \omega_k$ ^[17] 表示由敌方发送的欺骗攻击信号,这意味着系统输出 \tilde{y}_k 可能被攻击信号 ω_k 取代. 这里欺骗攻击信号为能量有界量,即 ω_k 满足

$$\sum_{k=0}^{\infty} \|\omega_k\|^2 \leq \bar{\omega}, \omega_k \in \Upsilon. \quad (3)$$

其中: $\|\cdot\|$ 为欧几里得范数,

$$\Upsilon \triangleq \left\{ \omega_k \in \mathbb{R}^{n_y} \mid \omega_k = \sum_{l=1}^{N_l} \tilde{h}_l \omega^l, \tilde{h}_l \geq 0, \sum_{l=1}^{N_l} \tilde{h}_l = 1 \right\}.$$

$\omega^l (l \in \mathbb{N}_{N_l+})$ 是攻击信号的顶点, ω_k 可由 $\omega^l (l \in \mathbb{N}_{N_l+})$ 以及参数 $\tilde{h}_l (l \in \mathbb{N}_{N_l+})$ 线性表示, $\bar{\omega}$ 是给定的上界. 在式(2)中,标量 σ_k 是一个在 k 时的随机变量,它由伯努利白噪声序列表示,即

$$\Pr\{\sigma_k = 1\} = \bar{\sigma}, \Pr\{\sigma_k = 0\} = 1 - \bar{\sigma},$$

其中 $\bar{\sigma} \in [0, 1]$ 表示欺骗攻击发生的概率.

由模糊化、模糊推理和解模糊过程,关于式(1)和(2)的全局模型可重写为

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_\rho x_k + B_\rho u_k, \\ y_k = (1 - \sigma_k) C_\rho x_k + \sigma_k \omega_k, \\ z_k = D_\rho x_k; \end{cases} \quad (4)$$

$$[A_\rho \ B_\rho \ C_\rho \ D_\rho] = \sum_{i=1}^{N_s} \rho^i(x_k) [A^i \ B^i \ C^i \ D^i];$$

$$\rho^i(x_k) = \frac{\underline{\rho}^i(x_k) \underline{\phi}^i(x_k) + \bar{\rho}^i(x_k) \bar{\phi}^i(x_k)}{\sum_{i=1}^{N_s} (\underline{\rho}^i(x_k) \underline{\phi}^i(x_k) + \bar{\rho}^i(x_k) \bar{\phi}^i(x_k))}$$

为模糊权重且有 $\sum_{i=1}^{N_s} \rho^i(x_k) = 1$, $\underline{\phi}^i(x_k)$ 和 $\bar{\phi}^i(x_k)$ 是满足 $\underline{\phi}^i(x_k) + \bar{\phi}^i(x_k) = 1$ 的非线性权重. 当系统中发生参数扰动时,可以通过调整非线性权重来及时修正实际隶属度函数,一组权重对应于一组不确定参数的固定值. 因此,系统矩阵满足

$$\begin{aligned} [A_\rho \ B_\rho \ C_\rho \ D_\rho] &\in \Xi \triangleq \\ \text{Co}\{[A^1 \ B^1 \ C^1 \ D^1], \dots, [A^{N_s} \ B^{N_s} \ C^{N_s} \ D^{N_s}]\}. \end{aligned} \quad (5)$$

鉴于实际需要,考虑控制输入和状态的以下硬约束:

$$\begin{cases} |[u_k]_{o_1}| \leq \bar{u}, o_1 \in \mathbb{N}_{n_u+}; \\ |[x_k]_{o_2}| \leq \bar{x}, o_2 \in \mathbb{N}_{n_x+}. \end{cases}$$

1.2 基于观测器的控制器

在本文中,观测器与系统具有相同的隶属度函数表达式. 观测器的隶属度函数依赖于估计状态. 下式给出了模糊形式的状态观测器的推理规则:

$$\begin{aligned} R_o^i: & \text{如果 } a_1(\hat{x}_k) \text{ 属于 } F_1^i, a_2(\hat{x}_k) \text{ 属于 } F_2^i, \dots, \\ & \text{且 } a_{n_s}(\hat{x}_k) \text{ 属于 } F_{n_s}^i, \text{ 则} \\ & \hat{x}_{k+1} = A^i \hat{x}_k + B^i u_k + L^i y_k. \end{aligned}$$

其中: $y_k \triangleq y_k - C^i \hat{x}_k$, $\hat{x}_k \in \mathbb{R}^{n_x}$ 表示估计状态, $R_o^i (i \in \mathbb{N}_{N_s+})$ 表示EMPC框架下的观测器 N_s 条模糊规则. 通过模糊化、模糊推理和解模糊过程,观测器可以表示为

$$\hat{x}_{n+1,k} = A_\rho \hat{x}_{n,k} + B_\rho u_{n,k} + L_\rho y_{n,k}, \quad (6)$$

其中: $(\cdot)_{n,k}$ 表示基于当前时刻 k 的预测时刻 $k+n$ 的值或变量,有 $(\cdot)_{0,k} = (\cdot)_k$; $L_\rho = \sum_{i=1}^{N_s} \rho^i(\hat{x}_{n,k}) L^i$; $y_{n,k} \triangleq y_{n,k} - C_\rho \hat{x}_{n,k}$; A_ρ, B_ρ, C_ρ 表示以 $\rho^i(\hat{x}_{n,k})$ 为隶属度权重的系统模糊参数,是预测时域的值,后续均采用 ρ 为下标来表示预测时域的模糊系统参数和观测器增益.

以下为EMPC双模控制器的模糊规则:

$$\begin{aligned} R_c^j: & \text{如果 } b_1(\hat{x}_k) \text{ 属于 } G_1^j, b_2(\hat{x}_k) \text{ 属于 } G_2^j, \dots, \\ & \text{且 } b_{n_c}(\hat{x}_k) \text{ 属于 } G_{n_c}^j, \text{ 则} \end{aligned}$$

$$u_{n,k} = \begin{cases} K^j \hat{x}_{n,k} + d_{n,k}^j, n \in \mathbb{N}_{n_d-1}; \\ K^j \hat{x}_{n,k}, n = n_d, n_d + 1, \dots \end{cases}$$

其中: $R_c^j (j \in \mathbb{N}_{N_c+})$ 表示控制器的 N_c 条模糊规则; 记 $b(\hat{x}_k) \triangleq [b_1(\hat{x}_k), b_2(\hat{x}_k), \dots, b_{n_c}(\hat{x}_k)]$, $b_j(\hat{x}_k) (j \in \mathbb{N}_{n_c+})$ 是基于 \hat{x}_k 的控制器的前件变量, n_c 表示前件变量的个数; $G_j^j (j \in \mathbb{N}_{N_c+}, j \in \mathbb{N}_{n_c+})$ 表示模糊集合.

R_c^j 的激励强度为

$$\tau^j(\hat{x}_k) \in \Psi^j(\hat{x}_k) \triangleq [\underline{\tau}^j(\hat{x}_k), \bar{\tau}^j(\hat{x}_k)].$$

其中: $\underline{\tau}^j(\hat{x}_k) = \prod_{j=1}^{n_c} \underline{\nu}_{G_j^j}(b_j(\hat{x}_k)) \geq 0$ 和 $\bar{\tau}^j(\hat{x}_k) = \prod_{j=1}^{n_c} \bar{\nu}_{G_j^j}(b_j(\hat{x}_k)) \geq 0$ 分别表示下和上隶属度; $\underline{\nu}_{G_j^j}(b_j(\hat{x}_k)) \in [0, 1]$ 和 $\bar{\nu}_{G_j^j}(b_j(\hat{x}_k)) \in [0, 1]$ 表示在模糊集 G_j^j 中 $b_j(\hat{x}_k)$ 的下和上隶属函数. 很明显 $\underline{\tau}^j(\hat{x}_k) \leq \bar{\tau}^j(\hat{x}_k)$, $\underline{\nu}_{G_j^j}(b_j(\hat{x}_k)) \leq \bar{\nu}_{G_j^j}(b_j(\hat{x}_k))$.

同样,EMPC策略下的T-S模糊预测控制器可通过下式表示:

$$u_{n,k} = \begin{cases} K_\tau \hat{x}_{n,k} + d_{n,k}, & n \in \mathbb{N}_{n_d-1}; \\ K_\tau \hat{x}_{n,k}, & n = n_d, n_d + 1, \dots \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中的模糊化参数可由顶点线性表示为

$$[K_\tau d_{n,k}] = \sum_{j=1}^{N_c} \tau^j(\hat{x}_{n,k}) [K^j d_{n,k}^j].$$

其中

$$\tau^j(\hat{x}_k) = \frac{\underline{\tau}^j(\hat{x}_k)\underline{\varphi}^j(\hat{x}_k) + \bar{\tau}^j(\hat{x}_k)\bar{\varphi}^j(\hat{x}_k)}{\sum_{j=1}^{N_c} (\underline{\tau}^j(\hat{x}_k)\underline{\varphi}^j(\hat{x}_k) + \bar{\tau}^j(\hat{x}_k)\bar{\varphi}^j(\hat{x}_k))}$$

是控制器模糊权重,满足 $\sum_{j=1}^{N_c} \tau^j(\hat{x}_k) = 1$; $\underline{\varphi}^j(\hat{x}_k)$ 和 $\bar{\varphi}^j(\hat{x}_k)$ 是满足 $\underline{\varphi}^j(\hat{x}_k) + \bar{\varphi}^j(\hat{x}_k) = 1$ 的非线性权重.

在EMPC框架中, L^i 和 K^j 是适当维数的未知矩阵,需要离线设计. 此外, $d_{n,k}^j \in \mathbb{R}^{n_u}$ 是在线设计的用于微调控制输入的摄动量,它能有效地扩大初始可行域. 自由度 n_d 是根据初始可行域的要求离线设计的,当 $n \geq n_d$ 时 $d_{n,k}^j = 0$.

注1 由于 L_ρ 、 K_τ 是随预测时域改变的模糊依赖的待求增益,为了方便,后续的离线设计部分也用 L_ρ 、 K_τ 表示终端约束集内待求的固定增益.

1.3 预备知识

定义1^[17] 对于受控系统(4),集合 $\bar{\Omega}$ 被称为正控制不变集,若对于 $\xi_k \in \bar{\Omega}$ 以及满足式(3)的不确定项 ω_k ,存在容许的控制输入 u_0, u_1, \dots , 使得 $\xi_{k+n} \in \bar{\Omega}, n = 0, 1, \dots$

定义2^[17] 对于带有欺骗攻击的受控系统(4),若以下两个条件成立:1)当 $\omega_k = 0$ 时,系统是均方稳定的;2)在零初始条件和给定标量 $\lambda > 0$ 的情况下,有 $\sum_{k=0}^{\infty} \|z_k\|^2 \leq \lambda \sum_{k=0}^{\infty} \|\omega_k\|^2$. 则称系统(4)在均方(MS)意义下安全. 在式(4)满足均方意义安全的条件下,同时存在正标量 γ_0 ,使得以下条件成立: $\sum_{k=0}^{\infty} \|z_k\|^2 \leq \gamma_0$, 则称系统(4)在 H_2 意义下安全.

2 主要结论

2.1 EMPC的离线设计部分

2.1.1 离线优化问题的建立

令 $\xi_k = [x_k^T \hat{x}_k^T]^T$, $[\cdot]^T$ 表示矩阵或向量的转置. 关于 ξ_k 增广系统的紧凑形式可以写为

$$\begin{cases} \xi_{n+1,k} = \bar{A}_{\rho,\tau} \xi_{n,k} + (\sigma_k - \bar{\sigma}) \bar{A}_\rho \xi_{n,k} + \bar{B}_\rho \omega_{k+n} + (\sigma_k - \bar{\sigma}) \tilde{B}_\rho \omega_{k+n}, \\ z_{n,k} = \tilde{D}_\rho \xi_{n,k}. \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\mathcal{L} = L_\rho C_\rho, \mathcal{K} = A_\rho + B_\rho K_\tau, \tilde{\sigma} \triangleq 1 - \bar{\sigma},$$

$$\bar{A}_{\rho,\tau} = \begin{bmatrix} A_\rho & \mathcal{K} - A_\rho \\ \tilde{\sigma} \mathcal{L} & \mathcal{K} - \mathcal{L} \end{bmatrix}, \bar{B}_\rho = \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{\sigma} L_\rho \end{bmatrix},$$

$$\tilde{A}_\rho = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\mathcal{L} & 0 \end{bmatrix}, \tilde{B}_\rho = \begin{bmatrix} 0 \\ L_\rho \end{bmatrix}, \tilde{D}_\rho = [D_\rho \ 0].$$

设计以下基于无穷时域上的代价函数的“min-max”问题,用于求解基于观测器的控制器:

$$\min_{K_\tau, L_\rho} \max_{[A_\rho, B_\rho, C_\rho, D_\rho] \in \Xi} J_k^\infty,$$

其中 $J_k^\infty = \sum_{n=0}^{\infty} \|z_{n,k}\|^2$. 建立以下具有硬约束的离线优化问题以求解控制器参数:

$$\text{OP1: } \min_{K_\tau, L_\rho} \max_{[A_\rho, B_\rho, C_\rho, D_\rho] \in \Xi} J_k^\infty.$$

s.t. 式(8),

$$\| [u_{n,k}]_{o_1} \| \leq \bar{u}, \quad o_1 \in \mathbb{N}_{n_u}; \quad (9)$$

$$\| [x_{n,k}]_{o_2} \| \leq \bar{x}, \quad o_2 \in \mathbb{N}_{n_x}; \quad (10)$$

$$\mathbf{E}\{\Delta V_{n,k}\} \leq -(\|z_{n,k}\|^2 - \lambda \|\omega_{k+n}\|^2). \quad (11)$$

其中: $\mathbf{E}\{\Delta V_{n,k}\} \triangleq \mathbf{E}\{V_{n+1,k}\} - V_{n,k}$, $V_{n,k}$ 是类李雅普诺夫函数. 条件(11)用于获得目标函数 J_k^∞ 的最坏情况的值,并实现闭环系统(8)的鲁棒稳定性.

2.1.2 过程成本条件

引理1 给定参数 $\bar{\sigma}, \bar{\omega}, \lambda > 0$, 对于预测模型(8),可以满足条件(11),如果存在正定矩阵 Q^i 、 \tilde{Q}^i 和 Q_+^h (Q^i 和 Q_+^h 本质一样,为区分预测时域的此刻和下一时刻而分别标记),存在实数 $\gamma > 0$,以及一组 L^i 和 K^j 满足以下不等式 ($i, h \in \mathbb{N}_{N_s+}, j \in \mathbb{N}_{N_c+}$):

$$\begin{bmatrix} \tilde{Q}^i & * & * & * & * \\ 0 & \lambda \gamma I & * & * & * \\ \bar{A}^{ij} & \bar{B}^i & Q_+^h & * & * \\ \hat{\sigma} \tilde{A}^i & \hat{\sigma} \tilde{B}^i & 0 & Q_+^h & * \\ \tilde{D}^i & 0 & 0 & 0 & \hat{\gamma} I \end{bmatrix} \geq 0,$$

$$i, h \in \mathbb{N}_{N_s+}, j \in \mathbb{N}_{N_c+}; \quad (12)$$

$$Q^i \tilde{Q}^i = I, \quad i \in \mathbb{N}_{N_s+}. \quad (13)$$

其中

$$\hat{\sigma} \triangleq \sqrt{\bar{\sigma}(1-\bar{\sigma})}, \mathcal{L}^i = L^i C^i, \mathcal{K}^{ij} = A^i + B^i K^j,$$

$$Q^i = \text{diag}\{Q_1^i, Q_2^i\}, \tilde{Q}^i = \{\tilde{Q}_1^i, \tilde{Q}_2^i\},$$

$$\tilde{Q}_1^i \triangleq (Q_1^i)^{-1}, \tilde{Q}_2^i \triangleq (Q_2^i)^{-1},$$

$$Q_+^h = \text{diag}\{Q_{1+}^h, Q_{2+}^h\}, \hat{\gamma} \triangleq \gamma - \lambda \bar{\omega},$$

$$\bar{A}^{ij} = \begin{bmatrix} A^i & \mathcal{K}^{ij} - A^i \\ \bar{\sigma}\mathcal{L}^i & \mathcal{K}^{ij} - \mathcal{L}^i \end{bmatrix}, \bar{B}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\sigma}L^i \end{bmatrix},$$

$$\tilde{A}^i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\mathcal{L}^i & 0 \end{bmatrix}, \tilde{B}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ L^i \end{bmatrix}, \tilde{D}^i = [D^i \ 0].$$

证明 选择一个类李雅普诺夫函数 $V_{n,k} = \xi_{n,k}^T P_\rho \xi_{n,k} \left(P_\rho = \sum_{i=1}^{N_s} \rho^i(x) P^i \right)$, 则根据式(8)可得

$$\begin{aligned} E\{\Delta V_{n,k}\} = & (\bar{A}_{\rho,\tau}\xi_{n,k})^T P_{\rho+} \bar{A}_{\rho,\tau}\xi_{n,k} + (\bar{A}_{\rho,\tau}\xi_{n,k})^T P_{\rho+} \bar{B}_\rho \omega_{k+n} + \\ & \hat{\sigma}^2 (\tilde{A}_\rho \xi_{n,k})^T P_{\rho+} \tilde{A}_\rho \xi_{n,k} + \hat{\sigma}^2 (\tilde{A}_\rho \xi_{n,k})^T P_{\rho+} \tilde{B}_\rho \omega_{k+n} + \\ & (\bar{B}_\rho \omega_{k+n})^T P_{\rho+} \bar{A}_{\rho,\tau}\xi_{n,k} + (\bar{B}_\rho \omega_{k+n})^T P_{\rho+} \bar{B}_\rho \omega_{k+n} + \\ & \hat{\sigma}^2 (\tilde{B}_\rho \omega_{k+n})^T P_{\rho+} \tilde{A}_\rho \xi_{n,k} + \\ & \hat{\sigma}^2 (\tilde{B}_\rho \omega_{k+n})^T P_{\rho+} \tilde{B}_\rho \omega_{k+n} - \\ & \xi_{n,k}^T P_\rho \xi_{n,k} \left(P_{\rho+} = \sum_{h=1}^{N_s} \rho^h(x) P_+^h \right). \end{aligned}$$

对于条件(12), 用变量替换 $P^i = \hat{\gamma}(Q^i)^{-1} = \hat{\gamma}\tilde{Q}^i$ 和 $P_+^h = \hat{\gamma}(Q_+^h)^{-1}$, 可以得到

$$\begin{bmatrix} P^i & * & * & * & * \\ 0 & \lambda I & * & * & * \\ \bar{A}^{ij} & \bar{B}^i & (P_+^h)^{-1} & * & * \\ \hat{\sigma}\tilde{A}^i & \hat{\sigma}\tilde{B}^i & 0 & (P_+^h)^{-1} & * \\ \tilde{D}^i & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \geq 0. \quad (14)$$

利用舒尔补, 式(14)又可以写为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11} & \mathbf{X}_{12} \\ \mathbf{X}_{12}^T & \mathbf{X}_{22} \end{bmatrix} \leq 0. \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{11} = & (\bar{A}^{ij})^T P_+^h \bar{A}^{ij} + (\tilde{D}^i)^T \tilde{D}^i + \\ & \hat{\sigma}^2 (\tilde{A}^i)^T P_+^h \tilde{A}^i - P^i, \\ \mathbf{X}_{12} = & (\bar{A}^{ij})^T P_+^h \bar{B}^i + \hat{\sigma}^2 (\tilde{A}^i)^T P_+^h \tilde{B}^i, \\ \mathbf{X}_{22} = & (\bar{B}^i)^T P_+^h \bar{B}^i + \hat{\sigma}^2 (\tilde{B}^i)^T P_+^h \tilde{B}^i - \lambda I. \end{aligned}$$

将式(15)不等号两边同时左乘 $[\xi_{n,k}^T \ \omega_{k+n}^T]$ 以及右乘其转置, 得到

$$\begin{aligned} & \xi_{n,k}^T [(\bar{A}^{ij})^T P_+^h \bar{A}^{ij} + (\tilde{D}^i)^T \tilde{D}^i + \\ & \hat{\sigma}^2 (\tilde{A}^i)^T P_+^h \tilde{A}^i - P^i] \xi_{n,k} + 2\xi_{n,k}^T [(\bar{A}^{ij})^T P_+^h \bar{B}^i + \\ & \hat{\sigma}^2 (\tilde{A}^i)^T P_+^h \tilde{B}^i] \omega_{k+n} + \omega_{k+n}^T [(\bar{B}^i)^T P_+^h \bar{B}^i + \\ & \hat{\sigma}^2 (\tilde{B}^i)^T P_+^h \tilde{B}^i - \lambda I] \omega_{k+n} \leq 0. \end{aligned}$$

利用区间二型T-S模糊系统凸多面体(5)的性质, 可得 $E\{\Delta V_{n,k}\} \leq -\xi_{n,k}^T \tilde{D}_\rho^T \tilde{D}_\rho \xi_{n,k} + \lambda \omega_{k+n}^T \omega_{k+n}$, 这与式(11)等价. \square

注2 注意到等式(13)是一个非凸条件, 这很难直接在优化问题中使用. 为了克服这一困难, 本文采用CCL技术^[17]来得到可解的条件代替等式(13). 具体而言, 如果对于 $Q^i > 0, \tilde{Q}^i > 0$, 不等式

$$\begin{bmatrix} Q^i & I \\ I & \tilde{Q}^i \end{bmatrix} \geq 0 \quad (16)$$

可行, 则 $\text{trace}(Q^i \tilde{Q}^i) \geq 2n_x$ (trace表示矩阵的迹), 且 $\text{trace}(Q^i \tilde{Q}^i) = 2n_x$ 当且仅当 $Q^i \tilde{Q}^i = I$.

2.1.3 辅助优化问题

由于目标函数是在无限时域范围内考虑的, 直接解决“min-max”问题OP1在技术上仍然困难, 有必要提出一个辅助优化问题. 考虑到性能指标函数 $J_k^\infty = \sum_{n=0}^\infty \|z_{n,k}\|^2$ 的非负性和有界性, 一定有 $z_{\infty,k} = 0$, 这意味着 $E\{V_{\infty,k}\} = 0$. 另一方面, 由式(11)可得 $\|z_{n,k}\|^2 \leq -E(\Delta V) + \lambda \|\omega_{k+n}\|^2$. 将此不等式两边从0到 ∞ 相加, 得到

$$\sum_{n=0}^\infty \|z_{n,k}\|^2 \leq \xi_k^T P_\rho \xi_k + \lambda \sum_{n=0}^\infty \|\omega_{k+n}\|^2.$$

定义集合

$$\Omega_\xi \triangleq \{\xi_{n,k} | \xi_{n,k}^T P_\rho \xi_{n,k} \leq \gamma - \lambda \bar{\omega}\}. \quad (17)$$

与文献[18]相似, 根据式(11)可以得到 Ω_ξ 对于闭环系统(8)是一个正控制不变集. 如果 $\xi_{n,k} \in \Omega_\xi$ 满足, 则基于式(3), 有 $J_k^\infty = \sum_{n=0}^\infty \|z_{n,k}\|^2 \leq \xi_k^T P_\rho \xi_k + \lambda \sum_{n=0}^\infty \|\omega_{k+n}\|^2 \leq \xi_k^T P_\rho \xi_k + \lambda \bar{\omega} \leq \gamma$, 由此得到 J_k^∞ 的一个上界 γ . 借助于Schur补并作替换 $P_\rho = (\gamma - \lambda \bar{\omega}) Q_\rho^{-1}$, 正控制不变集条件 $\xi_{n,k} \in \Omega_\xi (n = 0, 1, \dots)$ 满足, 当且仅当

$$\begin{bmatrix} 1 & * \\ \xi_{n,k} & Q_\rho \end{bmatrix} \geq 0, \quad n = 0, 1, \dots \quad (18)$$

到目前为止, 如果过程成本条件(11)、正控制不变集条件(18)以及硬约束条件(9)和(10)同时得到满足, 则由式(17)定义的集合 Ω_ξ 是一个终端约束集.

引理2 给定 $\bar{x} > 0$ 和 $\bar{u} > 0$, 对于闭环系统(8), 满足约束条件(9)和(10), 若存在正定矩阵 $Q^i, U^i, X^i (i \in \mathbb{N}_{N_s+})$ 和矩阵 $K^j (j \in \mathbb{N}_{N_c+})$ 满足如下条件:

$$\begin{bmatrix} U^i & * \\ [0 \ I]^T (K^j)^T & Q^i \end{bmatrix} \geq 0, \quad [U^i]_{o_1 o_1} \leq [\bar{u}]_{o_1}^2,$$

$$o_1 \in \mathbb{N}_{n_u+}, \quad i \in \mathbb{N}_{N_s+}, \quad j \in \mathbb{N}_{N_c+}; \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} X^i & * \\ [I \ 0]^T & Q^i \end{bmatrix} \geq 0, \quad [X^i]_{o_2 o_2} \leq [\bar{x}]_{o_2}^2,$$

$$o_2 \in \mathbb{N}_{n_x+}, \quad i \in \mathbb{N}_{N_s+}. \quad (20)$$

其中 $[\cdot]_{o_1 o_1}$ ($[\cdot]_{o_2 o_2}$)表示第 o_1 (o_2)行(个)元素.

利用柯西-施瓦茨不等式^[18]以及式(18)~(20)即可证明引理2. 具体证明过程参见文献[18], 此略.

通过上述分析以及注2, 关于OP1的可解的辅助优化问题^[17]如下:

$$\text{OP2: } \min_{K^j, L^j} \left\{ \gamma + \sum_{i=1}^{N_s} \text{trace}(Q^i \tilde{Q}^i) \right\};$$

s.t. 式(12), (16), (19), (20).

基于引理1, 离线求解OP2获得的观测器增益 L^i 和控制器增益 K^j , 可以实现闭环系统(8)在 H_2 意义的安全, 这将在2.3节讨论. 但是, 一般的单模在线MPC方法中, 终端约束集作为初始可行域通常很小, 无法包含实际初始状态. 以下将通过EMPC框架中的摄动量来扩大初始可行域.

2.2 摄动量的相关设计

2.2.1 最大化初始可行域

首先构造一个适当的优化问题, 以获得足够大的初始可行域. 令 $f_k = [d_k^T \ d_{k+1}^T \ \dots \ d_{k+n_d-1}^T]^T \in \mathbb{R}^{n_u n_d}$, $\zeta_k = [\xi_k^T \ f_k^T]^T$, 则增广后的闭环系统预测模型可以写为

$$\begin{cases} \zeta_{n+1, k} = \bar{A}_{\rho, \tau} \zeta_{n, k} + (\sigma_k - \bar{\sigma}) \bar{A}_{\rho} \zeta_{n, k} + \\ \quad \bar{B}_{\rho} \omega_{k+n} + (\sigma_k - \bar{\sigma}) \bar{B}_{\rho} \omega_{k+n}, \\ z_{n, k} = \hat{D}_{\rho} \zeta_{n, k}. \end{cases} \quad (21)$$

其中

$$\hat{D}_{\rho} = [D_{\rho} \ 0 \ 0], \quad \Pi = [I \ 0 \ \dots \ 0],$$

$$\bar{A}_{\rho, \tau} = \begin{bmatrix} A_{\rho} & \mathcal{K} - A_{\rho} & B_{\rho} \Pi \\ \bar{\sigma} \mathcal{L} & \mathcal{K} - \mathcal{L} & B_{\rho} \Pi \\ 0 & 0 & \Gamma \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_{\rho} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\sigma} L_{\rho} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{A}_{\rho} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\mathcal{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_{\rho} = \begin{bmatrix} 0 \\ L_{\rho} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 0 & I & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & I \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

为了保证递推可行性, 增广系统(21)的初始可行域需要是一个正控制不变集. 定义如下集合:

$$\Omega_{\zeta} \triangleq \{ \zeta_{n, k} | \zeta_{n, k}^T \hat{P}_{\rho} \zeta_{n, k} \leq \gamma - \lambda \bar{\omega} \}, \quad (22)$$

其中矩阵 $\hat{P}_{\rho} = \sum_{i=1}^{N_s} \rho^i(x) \hat{P}^i$ 是对称正定的. 利用变量替换 $\hat{P}^i = (\gamma - \lambda \bar{\omega})(\hat{Q}^i)^{-1}$, 式(22)可重写为

$$\Omega_{\zeta} \triangleq \{ \zeta_{n, k} | \zeta_{n, k}^T \hat{Q}_{\rho}^{-1} \zeta_{n, k} \leq 1 \}. \quad (23)$$

其中: $\hat{Q}_{\rho} = \sum_{i=1}^{N_s} \rho^i(x) \hat{Q}^i$, $(\hat{Q}^i)^{-1} = \begin{bmatrix} \hat{Q}_{11}^i & * \\ \hat{Q}_{21}^i & \hat{Q}_{22}^i \end{bmatrix}$,

$\hat{Q}_{\rho+} = \sum_{h=1}^{N_s} \rho^h(x) \hat{Q}_{+}^h$. 以下引理将给出检验式(23)的

充分条件.

引理3 通过OP2先求解出控制器增益 K^j 和观测器增益 L^i , 以及 \bar{A}^{ij} , \bar{B}^i , \bar{A}^i , \bar{B}^i . 对于带有硬约束的增广系统(21), 集合 Ω_{ζ} 是正控制不变集, 若存在矩阵 $\hat{Q}^i > 0$, $\hat{Q}_{+}^h > 0$, $\hat{U}^i > 0$ 和 $\hat{X}^i > 0$ ($i, h \in \mathbb{N}_{N_s+}$)满足

$$\begin{bmatrix} \hat{Q}^i & * & * & * & * \\ 0 & \lambda \hat{\gamma} I & * & * & * \\ \bar{A}^{ij} \hat{Q}^i & \bar{B}^i & \hat{Q}_{+}^h & * & * \\ \hat{\sigma} \bar{A}^i \hat{Q}^i & \hat{\sigma} \bar{B}^i & 0 & \hat{Q}_{+}^h & * \\ \hat{D}^i \hat{Q}^i & 0 & 0 & 0 & \hat{\gamma} I \end{bmatrix} \geq 0,$$

$$i, h \in \mathbb{N}_{N_s+}, j \in \mathbb{N}_{N_c+}, \hat{\gamma} \triangleq \gamma - \lambda \bar{\omega}; \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{U}^i & * \\ [0 \ K^j \ \Pi]^T & \hat{Q}^i \end{bmatrix} \geq 0, \quad [\hat{U}^i]_{o_1 o_1} \leq [\bar{u}]_{o_1}^2,$$

$$o_1 \in \mathbb{N}_{n_u+}, i \in \mathbb{N}_{N_s+}, j \in \mathbb{N}_{N_c+}; \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{X}^i & * \\ [I \ 0 \ 0]^T & \hat{Q}^i \end{bmatrix} \geq 0, \quad [\hat{X}^i]_{o_2 o_2} \leq [\bar{x}]_{o_2}^2,$$

$$o_2 \in \mathbb{N}_{n_x+}, i \in \mathbb{N}_{N_s+}. \quad (26)$$

其中

$$\bar{A}^{ij} = \begin{bmatrix} A^i & \mathcal{K}^{ij} - A^i B^i \Pi \\ \bar{\sigma} \mathcal{L}^i & \mathcal{K}^{ij} - \mathcal{L}^i B^i \Pi \\ 0 & 0 & \Gamma \end{bmatrix}, \quad \bar{B}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\sigma} L^i \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{A}^i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\mathcal{L}^i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{B}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ L^i \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{D}^i = [D^i \ 0 \ 0].$$

证明同引理1和引理2, 在此省略.

为了表示关于 ξ 的控制不变集(以下均称为 ξ -不变集)的一般形式, 本文令在 ξ 空间上 ζ -不变集的投影是 $\Omega_{\xi \zeta}$. 令 $W = [I_{2n_x} \ 0_{2n_x \times n_u n_d}]$, 可以得到 $\xi_k = W \zeta_k$. 不等式(23)也可写为

$$\begin{bmatrix} W & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{Q}_{\rho} & * \\ \zeta_{n, k}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W^T & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \geq 0. \quad (27)$$

定义如下集合:

$$\Omega_{\xi \zeta} \triangleq \{ \xi_{n, k} | \xi_{n, k}^T (W \hat{Q}_{\rho} W^T)^{-1} \xi_{n, k} \leq 1 \}.$$

当 Ω_{ζ} 对于系统(21)而言是正控制不变集时, 根据式(27), $\Omega_{\xi \zeta}$ 对于系统(8)也是正控制不变集. 以下给出一个优化问题^[18]来得到一个较大的初始可行域 $\Omega_{\xi \zeta}$:

$$\text{OP3: } \min_{\hat{Q}_{\rho}} \log \det(W \hat{Q}_{\rho} W^T)^{-1};$$

$$\text{s.t. 式(24) ~ (26).}$$

该优化问题是关于矩阵 $W \hat{Q}_{\rho} W^T$ 的凸优化问题, 相当于优化由正定矩阵 $(W \hat{Q}_{\rho} W^T)^{-1}$ 决定的椭球的

体积. 在求解过程中采用 Yalmip 工具箱中的 logdet() 函数作为优化问题的目标函数进行求解.

2.2.2 摄动量的在线计算

考虑到 K_τ 和 L_ρ 的最优性, d_k 可以被认为是控制律 $u_{n,k} = K_\tau \hat{x}_{n,k}$ 附加的微调控制变量, 其作用仅仅是确保预测轨迹在 Ξ 上的可行性. 因此, 建立以下关于 f_k 的优化问题来保证其可行性:

$$\begin{aligned} \text{OP4 : } \min_{f_k} & f_k^T f_k; \\ \text{s.t. } & \begin{bmatrix} 1 & * \\ \zeta_k & \hat{Q}_\rho \end{bmatrix} \geq 0. \end{aligned} \quad (28)$$

然而, ζ_k 包含不可测项 x_k , 条件(28)不能在线使用. 下面, 引入假设和引理来解决这个困难.

假设1 假设系统(21)的初始状态 x_0 属于一个已知的集合, 即以下条件成立:

$$x_0 \in \{x_k \mid \|x_k\|_{\hat{Q}_{aa}^i}^2 \leq \delta_1\}.$$

其中: \hat{Q}_{aa}^i 源自

$$\begin{aligned} \hat{Q}_{11}^i & \triangleq \begin{bmatrix} \hat{Q}_{aa}^i & * \\ \hat{Q}_{ba}^i & \hat{Q}_{bb}^i \end{bmatrix}, \\ \hat{Q}_\rho^{11} & = \sum_{i=1}^{N_s} \rho^i(x_k) \hat{Q}_{11}^i \triangleq \begin{bmatrix} \hat{Q}_\rho^{aa} & * \\ \hat{Q}_\rho^{ba} & \hat{Q}_\rho^{bb} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$0 < \delta_1 < 1$ 是一个预设的标量.

引理4 在假设1下, 可以在线满足约束(28), 如果存在对称正定矩阵 \mathcal{M}_1 、 \mathcal{M}_2 和摄动量 f_k , 给定预设定值 $\delta_2, \delta_3, \epsilon \in (0, 1), 4(\delta_1 + \delta_2) + 2\delta_3 \leq 1$ 使得以下条件成立 ($k = 0, 1, \dots$):

$$\begin{bmatrix} \delta_2 & * \\ \hat{x}_k & \mathcal{M}_2 \end{bmatrix} \geq 0; \quad (29)$$

$$(\hat{Q}_{aa}^i)^{-1} \geq \mathcal{M}_1, (\hat{Q}_{bb}^i)^{-1} \geq \mathcal{M}_2, i \in \mathbb{N}_{N_s+}; \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} \mathcal{Q}^i & * & * \\ \sqrt{2}\bar{A}^{ij} & \epsilon\mathcal{M} & * \\ \sqrt{2}\hat{\sigma}\tilde{A}^i & 0 & \epsilon\mathcal{M} \end{bmatrix} \geq 0, \quad (31)$$

$i \in \mathbb{N}_{N_s+}, j \in \mathbb{N}_{N_c+};$

$$\begin{bmatrix} 1 & * & * \\ \sqrt{2}\bar{B}^i\omega^\iota & \hat{\epsilon}\mathcal{M} & * \\ \sqrt{2}\hat{\sigma}\tilde{B}^i\omega^\iota & 0 & \hat{\epsilon}\mathcal{M} \end{bmatrix} \geq 0, \quad (32)$$

$i \in \mathbb{N}_{N_c+}, \iota \in \mathbb{N}_{N_\iota+};$

$$\begin{bmatrix} \theta\mathcal{Q}^i & * & * \\ \sqrt{2}[0 \ I]\bar{A}^{ij} & \epsilon\mathcal{M}_2 & * \\ \sqrt{2}\hat{\sigma}[0 \ I]\tilde{A}^i & 0 & \epsilon\mathcal{M}_2 \end{bmatrix} \geq 0, \quad (33)$$

$i \in \mathbb{N}_{N_s+}, j \in \mathbb{N}_{N_c+};$

$$\begin{bmatrix} \delta_2 & * & * \\ \sqrt{2}[0 \ I]\bar{B}^i\omega^\iota & \hat{\epsilon}\mathcal{M}_2 & * \\ \sqrt{2}\hat{\sigma}[0 \ I]\tilde{B}^i\omega^\iota & 0 & \hat{\epsilon}\mathcal{M}_2 \end{bmatrix} \geq 0, \quad (34)$$

$i \in \mathbb{N}_{N_c+}, \iota \in \mathbb{N}_{N_\iota+};$

$$\begin{bmatrix} \delta_3 & * \\ \hat{Q}_{22}^i f_k & \hat{Q}_{22}^i \end{bmatrix} \geq 0, i \in \mathbb{N}_{N_s+}. \quad (35)$$

其中: $\mathcal{M} = \text{diag}\{\mathcal{M}_1, \mathcal{M}_2\}; \hat{\epsilon} \triangleq 1 - \epsilon, \theta \triangleq \frac{\delta_2}{2(\delta_1 + \delta_2)}$ 为给定标量; 矩阵 $\mathcal{Q}^i = \text{diag}\{2\hat{Q}_{aa}^i, 2\hat{Q}_{bb}^i\}; \bar{A}_{\rho, \tau}, \bar{A}_\rho, \bar{B}_\rho, \tilde{B}_\rho$ 可由OP2先行计算得出.

证明 当 $k = 0$ 时, 由假设1可知 $\|x_0\|_{\hat{Q}_{aa}^i}^2 \leq \delta_1$. 由式(28)可得

$$\begin{aligned} \xi_0^T \hat{Q}_{11}^i \xi_0 & \leq 2x_0^T \hat{Q}_{aa}^i x_0 + 2\hat{x}_0^T \hat{Q}_{bb}^i \hat{x}_0 = \\ & \xi_0^T \mathcal{Q}^i \xi_0 \leq 2(\delta_1 + \delta_2). \end{aligned}$$

经模糊化后, 有

$$\xi_0^T \hat{Q}_\rho^{11} \xi_0 \leq 2x_0^T \hat{Q}_\rho^{aa} x_0 + 2\hat{x}_0^T \hat{Q}_\rho^{bb} \hat{x}_0 \leq 2(\delta_1 + \delta_2).$$

此外, 根据式(35), 有 $f_k^T \hat{Q}_\rho^{22} f_k \leq \delta_3$. 考虑不等式

$$[f_k - (\hat{Q}_\rho^{22})^{-1} \hat{Q}_\rho^{21} \xi_k]^T \hat{Q}_\rho^{22} [f_k - (\hat{Q}_\rho^{22})^{-1} \hat{Q}_\rho^{21} \xi_k] \geq 0,$$

即

$$2f_k^T \hat{Q}_\rho^{21} \xi_k \leq f_k^T \hat{Q}_\rho^{22} f_k + \xi_k^T (\hat{Q}_\rho^{21})^T (\hat{Q}_\rho^{22})^{-1} \hat{Q}_\rho^{21} \xi_k,$$

由于矩阵 \hat{Q}_ρ 正定, 有 $\hat{Q}_\rho^{11} \geq (\hat{Q}_\rho^{21})^T (\hat{Q}_\rho^{22})^{-1} \hat{Q}_\rho^{21}$. 不等式两边同时左乘 ξ_k^T 及右乘其转置, 有

$$\xi_k^T (\hat{Q}_\rho^{21})^T (\hat{Q}_\rho^{22})^{-1} \hat{Q}_\rho^{21} \xi_k \leq \xi_k^T \hat{Q}_\rho^{11} \xi_k.$$

由该不等式, 可得

$$\begin{aligned} 1 - 2f_k^T \hat{Q}_\rho^{21} \xi_k - f_k^T \hat{Q}_\rho^{22} f_k & \geq \\ 1 - 2\delta_3 - 2(\delta_1 + \delta_2) & \geq 2(\delta_1 + \delta_2). \end{aligned}$$

因此, 在 $k = 0$ 时, 有 $\xi_0^T \hat{Q}_\rho^{11} \xi_0 \leq 1 - 2f_0^T \hat{Q}_\rho^{21} \xi_0 - f_0^T \hat{Q}_\rho^{22} f_0$, 也即, 式(28)在 $k = 0$ 时成立.

在 $k = 1$ 时刻, 根据条件(30)和(31), 很容易得到

$$2(\bar{A}^{ij})^T \mathcal{M}^{-1} \bar{A}^{ij} + 2\hat{\sigma}^2 (\tilde{A}^i)^T \mathcal{M}^{-1} \tilde{A}^i \leq \epsilon \mathcal{Q}^i.$$

对该式不等号两边同时左乘 ξ_0^T 以及右乘其转置, 有

$$\begin{aligned} 2\xi_0^T [(\bar{A}^{ij})^T \mathcal{M}^{-1} \bar{A}^{ij} + \hat{\sigma}^2 (\tilde{A}^i)^T \mathcal{M}^{-1} \tilde{A}^i] \xi_0 & \leq \\ \epsilon \xi_0^T \mathcal{Q}^i \xi_0 & \leq 2\epsilon(\delta_1 + \delta_2). \end{aligned}$$

类似地, 由式(30)和(32)可得

$$\begin{aligned} 2(\omega^\iota)^T [(\bar{B}^i)^T \mathcal{M}^{-1} \bar{B}^i + \hat{\sigma}^2 (\tilde{B}^i)^T \mathcal{M}^{-1} \tilde{B}^i] \omega^\iota & \leq \\ 2\hat{\epsilon}(\delta_1 + \delta_2). \end{aligned}$$

考虑以下不等式:

$$[\bar{A}^{ij} \xi_0 - \bar{B}^i \omega^\iota]^T \mathcal{M}^{-1} [\bar{A}^{ij} \xi_0 - \bar{B}^i \omega^\iota] \geq 0,$$

$$[\hat{\sigma} \tilde{A}^i \xi_0 - \hat{\sigma} \tilde{B}^i \omega^\iota]^T \mathcal{M}^{-1} [\hat{\sigma} \tilde{A}^i \xi_0 - \hat{\sigma} \tilde{B}^i \omega^\iota] \geq 0,$$

并考虑到模糊系统所在的多面体以及不确定项 ω_k 的所在集合 \mathcal{Y} 的凸性,可得

$$\mathbf{E}\{\|\bar{A}_{\rho,\tau}\xi_0 + (\sigma_0 - \bar{\sigma})\tilde{A}_{\rho}\xi_0 + \bar{B}_{\rho}\omega_0 + (\sigma_0 - \bar{\sigma})\tilde{B}_{\rho}\omega_0\|_{\mathcal{M}_1}^2\} \leq 2(\delta_1 + \delta_2).$$

这意味着当 $k=1$ 时, $\mathbf{E}\{\|\xi_1\|_{\mathcal{M}_1}^2\} \leq 1 - 2f_1^T \hat{Q}_{\rho}^{21} \xi_1 - f_1^T \hat{Q}_{\rho}^{22} f_1$. 由式(30)可得 $\mathbf{E}\{\|\xi_1\|_{\mathcal{M}_1}^2\} \geq \mathbf{E}\{\|\xi_1\|_{\mathcal{Q}_\rho^i}^2\}$, 因此有 $\mathbf{E}\{\|\xi_1\|_{\mathcal{M}_1}^2\} \geq \mathbf{E}\{\|\xi_1\|_{\mathcal{Q}_{\rho+}}^2\}$ (这里, $\mathcal{Q}_{\rho+} = \sum_{i=1}^{N_s} \rho^i(x_{1,k}) \mathcal{Q}^i$). 注意到以下不等式成立:

$$\xi_k^T \begin{bmatrix} -\hat{Q}_{aa}^i & \hat{Q}_{ab}^i \\ \hat{Q}_{ba}^i & -\hat{Q}_{bb}^i \end{bmatrix} \xi_k \leq 0,$$

则有

$$\begin{aligned} \xi_1^T \mathcal{Q}^i \xi_1 &= \\ 2x_1^T \hat{Q}_{aa}^i x_1 + 2\hat{x}_1^T \hat{Q}_{bb}^i \hat{x}_1 &\geq \\ x_1^T \hat{Q}_{aa}^i x_1 + 2x_1^T \hat{Q}_{ab}^i \hat{x}_1 + \hat{x}_1^T \hat{Q}_{bb}^i \hat{x}_1 &= \xi_1^T \hat{Q}_{11}^i \xi_1. \end{aligned}$$

上式经模糊化后得到 $\xi_1^T \mathcal{Q}_{\rho+} \xi_1 \geq \xi_1^T \hat{Q}_{\rho}^{11} \xi_1$. 综上分析, 可得

$$\begin{aligned} 1 - 2f_1^T \hat{Q}_{\rho}^{21} \xi_1 - f_1^T \hat{Q}_{\rho}^{22} f_1 &\geq \\ \mathbf{E}\{\|\xi_1\|_{\mathcal{M}_1}^2\} &\geq \mathbf{E}\{\|\xi_1\|_{\mathcal{Q}_{\rho+}}^2\} \geq \mathbf{E}\{\|\xi_1\|_{\hat{Q}_{\rho}^{11}}^2\}. \end{aligned}$$

同样地, 由式(33)、(34)以及如下成立的不等式:

$$\begin{aligned} \|[0 \ I] \tilde{A}^i \hat{x}_0 - [0 \ I] \tilde{B}^i \omega_0\|_{\mathcal{M}_2}^2 &\geq 0, \\ \|\hat{\sigma}[0 \ I] \tilde{A}^i \hat{x}_0 - \hat{\sigma}[0 \ I] \tilde{B}^i \omega_0\|_{\mathcal{M}_2}^2 &\geq 0, \end{aligned}$$

可得 $\mathbf{E}\{\|\hat{x}_1\|_{\mathcal{M}_2}^2\} \leq \delta_2$. 同上述证明过程, 可得

$$\begin{aligned} 1 - 2f_1^T \hat{Q}_{\rho}^{21} \xi_1 - f_1^T \hat{Q}_{\rho}^{22} f_1 &\geq \\ 2(\delta_1 + \delta_2) > \delta_2 &\geq \mathbf{E}\{\|\hat{x}_1\|_{\mathcal{M}_2}^2\}. \end{aligned}$$

即式(29)在 $k=1$ 时成立.

根据以上分析, 条件(29)~(35)可使得 ξ_k 和 \hat{x}_k 的递推可行性在 $k=1$ 时刻得到保证. 因此, 由以上条件便可得知式(28)在 $k=1$ 时成立. \square

至此, 重新给出一个可行的在线优化问题来求解 d_k , 即

$$\begin{aligned} \text{OP5 : } \min_{f_k} f_k^T f_k; \\ \text{s.t. 式(29) ~ (35)}. \end{aligned}$$

2.3 可行性与稳定性

定理1 (可行性与稳定性) 给定 $\hat{Q}^i (i \in \mathbb{N}_{N_s+})$, 若在线优化问题OP5在 k 时刻实时可行, 则在时刻 $t > k$ 均方意义下递推可行. 若优化问题OP5递推可行, 则所设计的控制器(7)可使闭环系统(4)在 H_2 意

义下均方稳定(H_2 意义安全).

证明 证明分为以下两个方面:

1) 可行性. 注意到只有约束条件(29)和(35)依赖于当前增广状态 ζ_k , 因此, 只需要证明当 k 时刻OP5可行时, 也即存在 f_k 满足式(28)时, 这两个条件在 $t > k$ 的任意时刻可行即可. 在 k 时刻, 若式(28)成立, 则根据条件(24)、(29)~(35), 有 $\zeta_{1,k}^T \hat{Q}_{\rho+}^{-1} \zeta_{1,k} \leq 1$. 对于某个 $[A_{\rho} \ B_{\rho} \ C_{\rho} \ D_{\rho}] \in \Xi$, 有

$$\begin{aligned} \zeta_{k+1} &= \\ \bar{A}_{\rho,\tau} \zeta_k + (\sigma_k - \bar{\sigma}) \tilde{A}_{\rho} \zeta_k + \bar{B}_{\rho} \omega_k + \\ (\sigma_k - \bar{\sigma}) \tilde{B}_{\rho} \omega_k &= \zeta_{1,k}. \end{aligned}$$

因此, 有 $\mathbf{E}\{\zeta_{k+1}^T \hat{Q}_{\rho+}^{-1} \zeta_{k+1}\} \leq 1$. 此过程可以继续推至 $k+1, k+2, \dots$ 等时刻. 如此, 便保证了OP5的均方意义下的递推可行性.

2) 稳定性. 鉴于以上的可行性分析, 通过求解优化问题OP5得到的 d_k , 可以将初始状态在若干采样步内拖入终端约束集 $\Omega_{\xi\zeta}$. 因此, 仅证明终端约束集内系统在 H_2 意义下均方稳定即可. 令二次函数 $V_k = \xi_k^T P_{\rho} \xi_k$ (P_{ρ} 为求解OP2得到的矩阵), 则有

$$\mathbf{E}\{V_{k+1}^*\} - V_k^* \leq -\|z_k\|^2 + \lambda \|\omega_k\|^2, \quad (36)$$

其中 V_k^* 表示 V_k 在 k 时刻的最优值.

下面通过式(36)来分析系统性能. 首先令 $\omega_k = 0$. 由式(36)可以得到 $\mathbf{E}\{V_{k+1}^*\} \leq V_k^* - \|z_k\|^2$, 这意味着对于非零的 z_k , 有 $\mathbf{E}\{V_{k+1}^*\} \leq V_k^*$. 此外, 在零初始条件下, $\xi_0 = 0$, 给定的参数 $\lambda > 0$, 通过对式(36)两端从0到 ∞ 相加可得

$$\sum_{k=0}^{\infty} \|z_k\|^2 \leq \lambda \sum_{k=0}^{\infty} \|\omega_k\|^2.$$

因此, 依据定义2, 闭环系统(4)在均方意义下安全. 在均方安全的基础上, 考虑式(3), 类似地, 可由式(36)得到

$$\begin{aligned} -V_0^* &\leq \\ -\sum_{k=0}^{\infty} \|z_k\|^2 + \lambda \sum_{k=0}^{\infty} \|\omega_k\|^2 &\leq \\ -\sum_{k=0}^{\infty} \|z_k\|^2 + \lambda \bar{\omega}, & \end{aligned}$$

即

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{\infty} \|z_k\|^2 &\leq \\ \xi_0^T P_{\rho} \xi_0 + \lambda \bar{\omega} &\leq \gamma - \lambda \bar{\omega} + \lambda \bar{\omega} = \gamma. \end{aligned}$$

综上所述, 依照定义2可以得出结论, 闭环系统(4)在 H_2 意义下是均方安全的. \square

3 算法与仿真示例

3.1 算法流程

表1 带有欺骗攻击的区间二型T-S模糊系统EMPC算法

离线部分:	
step 1:	在初始时刻 k_0 , 求解优化问题 OP2 ^[17] , 得到反馈增益 K_τ 和观测器增益 L_ρ .
step 2:	得到 K_τ 和 L_ρ 后, 求解优化问题 OP3, 计算出 \hat{Q}_ρ , 得到最大的初始可行域, 将其记为 $\Omega_{\xi C}$. 若 $\xi_0 \in \Omega_{\xi C}$, 则跳至在线设计部分; 否则, 增加 n_d , 重新计算 \hat{Q}_ρ^* 以及对应的初始可行域 $\Omega_{\xi C}^*$.
在线部分:	
step 1:	在每个 k 时刻, 若 $k > k_0 + n_d - 1$, 则令 $d_k = 0$, 根据式 (7) 得到控制输入 u_k ; 否则, 通过求解优化问题 OP5 来确定 f_k , 使用 f_k 中的第 1 个 d_k 以及 step 2 解出的 K_τ 和 L_ρ 得到控制输入 u_k .
step 2:	将 u_k 作用于系统. 令 $k = k + 1$, 返回至 step 1.

3.2 仿真示例

为验证本文所提出算法的有效性, 考虑单连杆刚性机器人系统^[19]. 以 $T = 0.04$ s 的采样周期, 令 $x_k = [x_{1k} \ x_{2k}]^T, \hat{x}_k = [\hat{x}_{1k} \ \hat{x}_{2k}]^T$, 可以得到如下离散时间的区间二型T-S模糊系统的系统参数:

$$A^1 = \begin{bmatrix} 0.9832 & 0.0398 \\ -0.8353 & 0.9832 \end{bmatrix}, B^1 = \begin{bmatrix} 0.0010 \\ 0.2000 \end{bmatrix},$$

$$A^2 = \begin{bmatrix} 0.9893 & 0.0399 \\ -0.5329 & 0.9893 \end{bmatrix}, B^2 = \begin{bmatrix} 0.0009 \\ 0.1000 \end{bmatrix},$$

$$C^1 = C^2 = D^1 = D^2 = [0 \ 1].$$

其中: 区间二型T-S模糊系统两个顶点的下和上隶属度分别为

$$\underline{\rho}^1(x_k) = 0.8 - \frac{1.6}{\pi}|x_{1k}|, \bar{\rho}^1(x_k) = 1 - \frac{1.6}{\pi}|x_{1k}|,$$

$$\underline{\rho}^2(x_k) = 1 - \bar{\rho}^1(x_k), \bar{\rho}^2(x_k) = 1 - \underline{\rho}^1(x_k).$$

通过离线求解 OP2 得到控制器和观测器增益为 $K^1 = [0.4567, -0.5724], L^1 = [-0.0448, 0.1440]^T, K^2 = [0.4629, -0.5702], L^2 = [-0.0455, 0.1423]^T$.

控制器的下和上隶属度分别为

$$\tau^1(\hat{x}_k) = \bar{\tau}^1(\hat{x}_k) = \exp\{-\hat{x}_{1k}^2/0.35\},$$

$$\tau^2(\hat{x}_k) = 1 - \bar{\tau}^1(\hat{x}_k), \bar{\tau}^2(\hat{x}_k) = 1 - \tau^1(\hat{x}_k).$$

仿真的其他参数给定为 $\delta_1 = 0.2, \delta_2 = 0.03, \delta_3 = 0.01, \varepsilon = 0.9, \lambda = 0.1, \bar{\sigma} = 0.3, \bar{\omega} = 5, \omega_1 = 1.5, \omega_2 = -1.5, \bar{u} = 2, \bar{x} = [2, 2]^T$. 初值给定为 $x_0 = [-0.2, 1]^T, \hat{x}_0 = [-0.2, 0.8]^T, u_0 = 0, y_0 = 0.1$. 在系统运行的前 70 步内以概率 $\bar{\sigma} = 0.3$ 发生欺骗攻击, 幅值为 $\omega_k = \sin^2(k\pi/12)\omega_1 + \cos^2(k\pi/12)\omega_2$.

为评价所提出的带有欺骗攻击的区间二型T-S模糊系统的EMPC策略, 通过各方面比较系统的控制性能. 图1描述了欺骗攻击下采用EMPC方法时的系统状态响应曲线. 可以看出, 本文设计的EMPC方法能够逐步使系统状态趋于稳定. 本文还选取了在终端约束集内的状态 $x_0 = [0.2, 0]^T, \hat{x}_0 = [0, 0]^T$, 将EMPC策略与纯在线MPC策略^[17]的计算时间进行比较(见表2). 从表2中可以看出, EMPC的在线计算负担比在线MPC低很多. 图2显示了扩大前后的初始可行域对比, 这里摄动量自由度 $n_d = 11$. 综上, 本文所提出的EMPC策略可以保持较好的系统性能, 减少了在线计算量, 扩大了初始可行域.

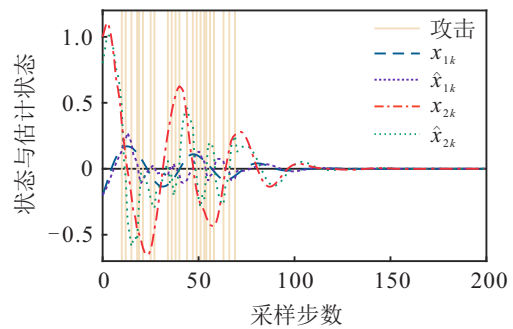


图1 带有攻击的系统状态响应

表2 在线计算时间对比

迭代次数	在线MPC计算时间/s	EMPC计算时间/s
2	2.950	0.273
20	23.137	0.726
100	109.422	2.459
200	221.125	4.771

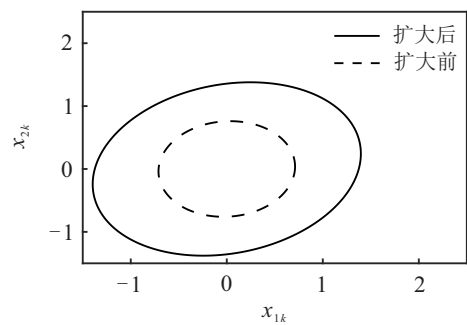


图2 初始可行域扩大前后对比

4 结论

本文研究了带有欺骗攻击的区间二型T-S模糊系统的高效模型预测控制问题. 设计了基于状态观测器的输出反馈控制器, 借助CCL技术提出了可解的优化问题求解终端集, 使得在终端约束集内系统满足 H_2 意义下的安全. 利用摄动量设计优化问题以求解扩大的初始可行域, 设计了在线优化问题求解摄动量. 此外, 本文给出了完整的EMPC控制算法, 证明了

所提出方法的可行性与控制系统的稳定性,最后,通过仿真算例验证了所提出方法在扩大初始可行域和减少在线计算量方面的有效性。

参考文献(References)

- [1] 寇发荣, 胡凯仑, 陈若晨, 等. 基于ResNeSt网络路面状态识别的主动悬架模型预测控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1849-1858.
(Kou F R, Hu K L, Chen R C, et al. Model predictive control of active suspension based on road surface condition recognition by ResNeSt[J]. Control and Decision, 2024, 39(6): 1849-1858.)
- [2] 苑守正, 刘志林, 郑林焯, 等. 基于事件触发自适应时域MPC的船舶靠泊方法研究[J]. 控制与决策, 2024, 39(1): 336-344.
(Yuan S Z, Liu Z L, Zheng L G, et al. Research on ship berthing based on event-triggered adaptive horizon MPC[J]. Control and Decision, 2024, 39(1): 336-344.)
- [3] Zhang L W, Xie W, Liu J F. Robust control of saturating systems with Markovian packet dropouts under distributed MPC[J]. ISA Transactions, 2019, 85: 49-59.
- [4] Wan Z Y, Kothare M V. An efficient off-line formulation of robust model predictive control using linear matrix inequalities[J]. Automatica, 2003, 39(5): 837-846.
- [5] Li D W, Xi Y G. Design of robust model predictive control based on multi-step control set[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(4): 433-437.
- [6] Song Y, Wang Z D, Zou L, et al. Endec-decoder-based N -step model predictive control: Detectability, stability and optimization[J]. Automatica, 2022, 135: 109961.
- [7] Kouvaritakis B, Rossiter J A, Schuurmans J. Efficient robust predictive control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(8): 1545-1549.
- [8] Hu J, Zhang H, Liu H, et al. A survey on sliding mode control for networked control systems[J]. International Journal of Systems Science, 2021, 52(6): 1129-1147.
- [9] Zhang L, Wang B, Zheng Y, et al. Robust packetized MPC for networked systems subject to packet dropouts and input saturation with quantized feedback[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, DOI: 10.1109/TCYB.2022.3166855.
- [10] 孙洪涛, 彭晨, 王志文. DoS攻击下的信息物理系统事件触发预测控制设计[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2303-2309.
(Sun H T, Peng C, Wang Z W. Event-triggered predictive control of cyber-physical systems under DoS attacks[J]. Control and Decision, 2019, 34(11): 2303-2309.)
- [11] Geng H, Wang Z D, Alsaadi F E, et al. Protocol-based fusion estimator design for state-saturated systems with dead-zone-like censoring under deception attacks[J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing Over Networks, 2022, 8: 37-48.
- [12] 叶丹, 王吉言. 多传感器系统的最优线性欺骗攻击设计[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2297-2302.
(Ye D, Wang J Y. Design of optimal linear deception attack for multi-sensor system[J]. Control and Decision, 2019, 34(11): 2297-2302.)
- [13] Cannon M, Kouvaritakis B, Wu X J. Probabilistic constrained MPC for multiplicative and additive stochastic uncertainty[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(7): 1626-1632.
- [14] Hu J, Ding B. An efficient offline implementation for output feedback min-max MPC[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2019, 29(2): 492-506.
- [15] Yang X Z, Lam H K, Wu L G. Membership-dependent stability conditions for type-1 and interval type-2 T-S fuzzy systems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2019, 356: 44-62.
- [16] Dong Y Y, Song Y, Wei G L. Efficient model-predictive control for networked interval type-2 T-S fuzzy system with stochastic communication protocol[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2021, 29(2): 286-297.
- [17] Wang J H, Song Y, Wei G L. Security-based resilient robust model predictive control for polytopic uncertain systems subject to deception attacks and RR protocol[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(8): 4772-4783.
- [18] Zhang B, Song Y. Model-predictive control for Markovian jump systems under asynchronous scenario: An optimizing prediction dynamics approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2022, 67(9): 4900-4907.
- [19] Li H, Wu C, Yin S, et al. Observer-based fuzzy control for nonlinear networked systems under unmeasurable premise variables[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 24(5): 1233-1245.

作者简介

马江涛(1998—), 男, 硕士生, 从事模型预测控制的研究, E-mail: ma_jiang_tao@163.com;

宋燕(1979—), 女, 教授, 博士生导师, 从事模型预测控制、大数据分析、图像处理等研究, E-mail: sonya@usst.edu.cn.