

不确定时变时滞系统的鲁棒二次稳定性分析

孙文虎

吉林师范大学数学学院, 吉林 四平

收稿日期: 2026年7月20日; 录用日期: 2026年8月25日; 发布日期: 2026年9月9日

摘 要

阐述针对不确定时变时滞系统的鲁棒二次稳定问题, 采用Lyapunov-Krasovskii泛函推导线性矩阵不等式条件并完成完整推导证明。依托系统稳定性等价关系完成理论推演, 验证所得判定结论的可行性。

关键词

不确定时变时滞系统, 鲁棒二次稳定, Lyapunov-Krasovskii泛函

Robust Quadratic Stability Analysis for Uncertain Time-Varying Delay Systems

Wenhu Sun

College of Mathematics, Jilin Normal University, Siping Jilin

Received: July 20, 2026; accepted: August 25, 2026; published: September 9, 2026

Abstract

Aiming at the robust quadratic stability problem of uncertain time-varying delay systems, the Lyapunov-Krasovskii functional is used to derive the linear matrix inequality conditions and complete the complete derivation and proof. Based on the equivalence relation of system stability, the theoretical deduction is completed, and the feasibility of the obtained conclusion is verified.

Keywords

Uncertain Time-Varying Delay Systems, Robust Quadratic Stability, Lyapunov-Krasovskii Functional

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

文章引用: 孙文虎. 不确定时变时滞系统的鲁棒二次稳定性分析[J]. 理论数学, 2026, 16(9): 47-52.

DOI: 10.12677/pm.2026.169197

1. 引言

不确定时变时滞系统是比定常时滞确定系统更具一般性的一类动力学系统。在系统分析中, 时变时滞与范数有界参数不确定性会相互耦合, 极易造成系统动态性能衰减, 甚至诱发失稳[1]。因此不确定时变时滞系统不仅要保证系统全局稳定运行, 还需抵御时变时滞与参数扰动带来的负面作用, 即满足二次稳定条件[2]。先前学者们围绕时滞系统完成了鲁棒镇定、状态估计、稳定性判据等多方面研究, 依托不等式放缩得到的 LMI 稳定判据普遍存在一定保守性[3] [4]。本文针对含范数有界不确定性的时变时滞系统开展二次稳定判定分析, 借助 Lyapunov-Krasovskii 泛函结合相关引理推导对应的充分性 LMI 判别条件, 相关研究内容能够对现有鲁棒时滞系统分析理论形成一定补充。

2. 预备知识

定义 1 对于不确定时变时滞系统, 如式

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = [A + DF(t)E_1]x(t) + [A_d + DF(t)E_d]x(t - \tau(t)) \\ x(t) = \phi(t), \quad t \in [-\bar{\tau}, 0] \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 是状态向量, $F(t) \in \mathbb{R}^{i \times j}$ 是满足 $F^T(t)F(t) \leq I$ 的不确定参数矩阵, 它可能是时变的; 实常数矩阵 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $D \in \mathbb{R}^{n \times i}$, $E_1 \in \mathbb{R}^{j \times n}$, $E_d \in \mathbb{R}^{j \times n}$ 。 $\tau(t)$ 表示时变的滞后时间, 满足 $0 \leq \tau(t) \leq \bar{\tau}$, 且 $0 \leq \dot{\tau}(t) \leq \mu < 1$, $\bar{\tau}$ 和 μ 为正标量常数。系统的初始条件为 $x(0) = x_0$, 其中 $\phi(t)$ 是连续的向量值函数。

定义 2 对不确定时变时滞系统(1), 如果存在 n 阶对称正定矩阵 M 和 N , 对所有允许的不确定性、时变时滞, Lyapunov-Krasovskii 泛函

$$V(x(t)) = x^T(t)Mx(t) + \int_{t-\tau(t)}^t x^T(s)Nx(s)ds + \bar{\tau} \int_{-\bar{\tau}}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{x}^T(s)R\dot{x}(s)dsd\theta$$

沿着系统轨迹满足 $\dot{V}(x(t)) < 0$, $\forall x(t) \neq 0$, 则称系统(1)是二次稳定的。

引理 1 若 $f(t)$ 为区间 $[a, b]$ 上的平方可积向量函数, $M \in \mathbb{R}^{k \times k}$ 为正定矩阵, 则

$$(b-a) \int_a^b f^T(s)Mf(s)ds \geq \left(\int_a^b f(s)ds \right)^T M \left(\int_a^b f(s)ds \right).$$

引理 2 给定适当维数的矩阵 Y , D , E 和 Λ , 其中 Y 是对称的, 则

$$Y + DFE + E^T F^T D^T + E^T F^T \Lambda FE < 0$$

对所有满足 $F^T F \leq I$ 的矩阵 F 成立, 当且仅当存在一个常数 $\varepsilon > 0$, 使得

$$\begin{bmatrix} Y + \varepsilon E^T E & D \\ D^T & \Lambda - \varepsilon I \end{bmatrix} < 0.$$

引理 3 设 $M(t)$, $N(t)$ 和 $P(t)$ 是具有适当维数的矩阵, $M(t)$ 和 $N(t)$ 是对称矩阵, 则对于任意的 $t \in \mathbb{R}$, 有

$$\begin{bmatrix} M(t) & P(t) \\ P^T(t) & N(t) \end{bmatrix} < 0$$

当且仅当 $N(t) < 0$ 及 $M(t) - P(t)N^{-1}(t)P^T(t) < 0$ 。

引理 4 矩阵函数 $\Xi(\lambda)$ 是关于参数 λ 的仿射函数, 如式

$$\Xi(\lambda) = \Xi_0 + \lambda \Xi_r$$

其中 $\lambda \in [0, \mu]$, Ξ_0 , Ξ_r 为对称矩阵。则以下两个条件等价:

- 1、对所有 $\lambda \in [0, \mu]$, $\Xi(\lambda) < 0$;
- 2、 $\Xi_0 < 0$ 且 $\Xi_0 + \mu \Xi_\tau < 0$ 。

3. 主要结论

定理 若存在对称正定矩阵 P , Q 和 S , 使得矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA + Q + \bar{\tau}^2 A^T S A & P A_d + \bar{\tau}^2 A^T S A_d & S & (A^T S + P) D & E_1^T \\ * & A_d^T S A_d - Q & 0 & A_d^T S D & E_d^T \\ * & * & -S & 0 & 0 \\ * & * & * & D^T S D - I & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA + Q + \bar{\tau}^2 A^T S A & P A_d + \bar{\tau}^2 A^T S A_d & S & (A^T S + P) D & E_1^T \\ * & A_d^T S A_d + (\mu - 1) Q & 0 & A_d^T S D & E_d^T \\ * & * & -S & 0 & 0 \\ * & * & * & D^T S D - I & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0,$$

成立, 则不确定时变时滞系统(1)是二次稳定的。其中的 $*$ 是由矩阵的对称性得到的矩阵块。

证明 对系统(1)构造 Lyapunov-Krasovskii 泛函:

$$\begin{aligned} V(x(t)) &= V_1(x(t)) + V_2(x(t)) + V_3(x(t)) \\ &= x^T(t) M x(t) + \int_{t-\tau(t)}^t x^T(s) N x(s) ds + \bar{\tau} \int_{-\bar{\tau}}^t \int_{t+\theta}^t \dot{x}^T(s) R \dot{x}(s) ds d\theta, \end{aligned}$$

其中 M , N 和 R 是 n 阶对称正定矩阵。沿着系统(1)的任意轨迹对 $V(x(t))$ 关于时间 t 微分, 可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(x(t)) &= \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau(t)) \\ x(t-\bar{\tau}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} (A + DF(t)E_1)^T M + M(A + DF(t)E_1) & M(A_d + DF(t)E_d) & 0 \\ (A_d + DF(t)E_d)^T M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau(t)) \\ x(t-\bar{\tau}) \end{bmatrix}, \\ \dot{V}_2(x(t)) &= \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau(t)) \\ x(t-\bar{\tau}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} N & 0 & 0 \\ 0 & (\dot{\tau}(t) - 1)N & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau(t)) \\ x(t-\bar{\tau}) \end{bmatrix}, \\ \dot{V}_3(x(t)) &= \bar{\tau}^2 \dot{x}^T(t) R \dot{x}(t) - \bar{\tau} \int_{t-\bar{\tau}}^t \dot{x}^T(s) R \dot{x}(s) ds, \end{aligned}$$

而对于 $\dot{V}_3(x(t))$, 由于 $\dot{x}(t)$ 为区间 $[t-\bar{\tau}, t]$ 上的平方可积向量函数, 根据引理 1 则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_3(x(t)) &\leq \bar{\tau}^2 \dot{x}^T(t) R \dot{x}(t) - (x(t) - x(t-\bar{\tau}))^T R (x(t) - x(t-\bar{\tau})) \\ &= \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau(t)) \\ x(t-\bar{\tau}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \bar{\tau}^2 (A + DF(t)E_1)^T R (A + DF(t)E_1) \\ \bar{\tau}^2 (A_d + DF(t)E_d)^T R (A + DF(t)E_1) \\ R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau(t)) \\ x(t-\bar{\tau}) \end{bmatrix} \\ &\quad - \begin{bmatrix} \bar{\tau}^2 (A + DF(t)E_1)^T R (A_d + DF(t)E_d) & R \\ \bar{\tau}^2 [A_d + DF(t)E_d]^T R (A_d + DF(t)E_d) & 0 \\ 0 & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau(t)) \\ x(t-\bar{\tau}) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

不确定时变时滞系统(1)二次稳定, 只需

$$\dot{V}(x(t)) = \xi^T(t) \Xi \xi(t) < 0,$$

其中

$$\begin{aligned} \xi(t) &= \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau(t)) \\ x(t-\bar{\tau}) \end{bmatrix} \\ \Xi &= \begin{bmatrix} (A+DF(t)E_1)^T M + M(A+DF(t)E_1) + N + \bar{\tau}^2 (A+DF(t)E_1)^T R(A+DF(t)E_1) & & & \\ (A_d+DF(t)E_d)^T M + \bar{\tau}^2 (A_d+DF(t)E_d)^T R(A+DF(t)E_1) & & & \\ R & & & \\ M(A_d+DF(t)E_d) + \bar{\tau}^2 (A+DF(t)E_1)^T R(A_d+DF(t)E_d) & R & & \\ (\dot{\tau}(t)-1)N + \bar{\tau}^2 [A_d+DF(t)E_d]^T R(A_d+DF(t)E_d) & 0 & & \\ 0 & & & -R \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

使得对所有满足 $F^T(t)F(t) \leq I$ 的不确定性矩阵 $F(t)$, 矩阵不等式 $\Xi < 0$ 成立。

对矩阵不等式进行矩阵拆分, 分离系统确定部分与不确定性耦合项。记

$$Y = \begin{bmatrix} A^T M + MA + N + \bar{\tau}^2 A^T R A & M A_d + \bar{\tau}^2 A^T R A_d & R \\ A_d^T M + \bar{\tau}^2 A_d^T R A & (\dot{\tau}(t)-1)N + A_d^T R A_d & 0 \\ R & 0 & -R \end{bmatrix},$$

则矩阵不等式(3)可以写成

$$Y + \begin{bmatrix} (A^T R + M)D \\ A_d^T R D \\ 0 \end{bmatrix} F(t) \begin{bmatrix} E_1^T \\ E_d^T \\ 0 \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} E_1^T \\ E_d^T \\ 0 \end{bmatrix} F^T(t) \begin{bmatrix} (A^T R + M)D \\ A_d^T R D \\ 0 \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} E_1^T \\ E_d^T \\ 0 \end{bmatrix} F^T(t) D^T R D F(t) \begin{bmatrix} E_1^T \\ E_d^T \\ 0 \end{bmatrix}^T < 0.$$

根据引理 2, 上式对所有满足 $F^T(t)F(t) \leq I$ 的参数不确定矩阵 $F(t)$ 成立, 当且仅当存在一个标量 $\varepsilon > 0$, 使得

$$\begin{bmatrix} A^T M + MA + N + \bar{\tau}^2 A^T R A + \varepsilon E_1^T E_1 & M A_d + \bar{\tau}^2 A^T R A_d + \varepsilon E_1^T E_d & R & (A^T R + M)D \\ A_d^T M + \bar{\tau}^2 A_d^T R A + \varepsilon E_d^T E_1 & (\dot{\tau}(t)-1)N + A_d^T R A_d + \varepsilon E_d^T E_d & 0 & A_d^T R D \\ R & 0 & -R & 0 \\ D^T (R A + M) & D^T R A_d & 0 & D^T R D - \varepsilon I \end{bmatrix} < 0 \quad (4)$$

对矩阵不等式(4)左边的矩阵分别左乘和右乘矩阵 $\text{diag}\{\sqrt{\varepsilon^{-1}}I, \sqrt{\varepsilon^{-1}}I, \sqrt{\varepsilon^{-1}}I, \sqrt{\varepsilon^{-1}}I\}$, 其中松弛变量 $\varepsilon > 0$, 根据合同变换性质矩阵不等式(4)等价于

$$\begin{bmatrix} A^T \frac{M}{\varepsilon} + \frac{M}{\varepsilon} A + \frac{N}{\varepsilon} + \bar{\tau}^2 A^T \frac{R}{\varepsilon} A + E_1^T E_1 & \frac{M}{\varepsilon} A_d + \bar{\tau}^2 A^T \frac{R}{\varepsilon} A_d + E_1^T E_d & \frac{R}{\varepsilon} & \left(A^T \frac{R}{\varepsilon} + \frac{M}{\varepsilon}\right)D \\ A_d^T \frac{M}{\varepsilon} + \bar{\tau}^2 A_d^T \frac{R}{\varepsilon} A + E_d^T E_1 & (\dot{\tau}(t)-1)\frac{N}{\varepsilon} + A_d^T \frac{R}{\varepsilon} A_d + E_d^T E_d & 0 & A_d^T \frac{R}{\varepsilon} D \\ \frac{R}{\varepsilon} & 0 & -\frac{R}{\varepsilon} & 0 \\ D^T \left(\frac{R}{\varepsilon} A + \frac{M}{\varepsilon}\right) & D^T \frac{R}{\varepsilon} A_d & 0 & D^T \frac{R}{\varepsilon} D - I \end{bmatrix} < 0. \quad (5)$$

对矩阵不等式(5)进行变形, 将含 $E^T E$ 的交叉项改写为负定二次型的分解形式, 得到

$$\begin{bmatrix} A^T \frac{M}{\varepsilon} + \frac{M}{\varepsilon} A + \frac{N}{\varepsilon} + \bar{\tau}^2 A^T \frac{R}{\varepsilon} A & \frac{M}{\varepsilon} A_d + \bar{\tau}^2 A^T \frac{R}{\varepsilon} A_d & \frac{R}{\varepsilon} & \left(A^T \frac{R}{\varepsilon} + \frac{M}{\varepsilon} \right) D \\ A_d^T \frac{M}{\varepsilon} + \bar{\tau}^2 A_d^T \frac{R}{\varepsilon} A & (\dot{\tau}(t)-1) \frac{N}{\varepsilon} + A_d^T \frac{R}{\varepsilon} A_d & 0 & A_d^T \frac{R}{\varepsilon} D \\ \frac{R}{\varepsilon} & 0 & \frac{-R}{\varepsilon} & 0 \\ D^T \left(\frac{R}{\varepsilon} A + \frac{M}{\varepsilon} \right) & D^T \frac{R}{\varepsilon} A_d & 0 & D^T \frac{R}{\varepsilon} D - I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_1^T \\ E_d^T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} (-I)^{-1} \begin{bmatrix} E_1^T \\ E_d^T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T < 0,$$

进一步利用引理 3, 上式等价于

$$\begin{bmatrix} A^T \frac{M}{\varepsilon} + \frac{M}{\varepsilon} A + \frac{N}{\varepsilon} + \bar{\tau}^2 A^T \frac{R}{\varepsilon} A & \frac{M}{\varepsilon} A_d + \bar{\tau}^2 A^T \frac{R}{\varepsilon} A_d & \frac{R}{\varepsilon} & \left(A^T \frac{R}{\varepsilon} + \frac{M}{\varepsilon} \right) D & E_1^T \\ A_d^T \frac{M}{\varepsilon} + \bar{\tau}^2 A_d^T \frac{R}{\varepsilon} A & (\dot{\tau}(t)-1) \frac{N}{\varepsilon} + A_d^T \frac{R}{\varepsilon} A_d & 0 & A_d^T \frac{R}{\varepsilon} D & E_d^T \\ \frac{R}{\varepsilon} & 0 & \frac{-R}{\varepsilon} & 0 & 0 \\ D^T \left(\frac{R}{\varepsilon} A + \frac{M}{\varepsilon} \right) & D^T \frac{R}{\varepsilon} A_d & 0 & D^T \frac{R}{\varepsilon} D - I & 0 \\ E_1 & E_d & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

拆分矩阵不等式(6)中含 $\dot{\tau}(t)$ 的线性项, 得到

$$\begin{bmatrix} A^T \frac{M}{\varepsilon} + \frac{M}{\varepsilon} A + \frac{N}{\varepsilon} + \bar{\tau}^2 A^T \frac{R}{\varepsilon} A & \frac{M}{\varepsilon} A_d + \bar{\tau}^2 A^T \frac{R}{\varepsilon} A_d & \frac{R}{\varepsilon} & \left(A^T \frac{R}{\varepsilon} + \frac{M}{\varepsilon} \right) D & E_1^T \\ A_d^T \frac{M}{\varepsilon} + \bar{\tau}^2 A_d^T \frac{R}{\varepsilon} A & A_d^T \frac{R}{\varepsilon} A_d - \frac{N}{\varepsilon} & 0 & A_d^T \frac{R}{\varepsilon} D & E_d^T \\ \frac{R}{\varepsilon} & 0 & \frac{-R}{\varepsilon} & 0 & 0 \\ D^T \left(\frac{R}{\varepsilon} A + \frac{M}{\varepsilon} \right) & D^T \frac{R}{\varepsilon} A_d & 0 & D^T \frac{R}{\varepsilon} D - I & 0 \\ E_1 & E_d & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} + \dot{\tau}(t) \text{diag} \left\{ 0, \frac{N}{\varepsilon}, 0, 0 \right\} < 0, \quad (7)$$

由于矩阵不等式在 $0 \leq \dot{\tau}(t) \leq \mu < 1$ 内对所有参数取值严格成立, 根据引理 4 给出的等价判定关系, 矩阵不等式等价于

$$\begin{bmatrix} \varepsilon^{-1} A^T M + \varepsilon^{-1} M A + \varepsilon^{-1} N + \varepsilon^{-1} \bar{\tau}^2 A^T R A & \varepsilon^{-1} M A_d + \varepsilon^{-1} \bar{\tau}^2 A^T R A_d & \varepsilon^{-1} R & \varepsilon^{-1} (A^T R + M) D & E_1^T \\ \varepsilon^{-1} A_d^T M + \varepsilon^{-1} \bar{\tau}^2 A_d^T R A & -\varepsilon^{-1} N + \varepsilon^{-1} A_d^T R A_d & 0 & \varepsilon^{-1} A_d^T R D & E_d^T \\ \varepsilon^{-1} R & 0 & -\varepsilon^{-1} R & 0 & 0 \\ \varepsilon^{-1} D^T (R A + M) & \varepsilon^{-1} D^T R A_d & 0 & \varepsilon^{-1} D^T R D - I & 0 \\ E_1 & E_d & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0,$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon^{-1} A^T M + \varepsilon^{-1} M A + \varepsilon^{-1} N + \varepsilon^{-1} \bar{\tau}^2 A^T R A & \varepsilon^{-1} M A_d + \varepsilon^{-1} \bar{\tau}^2 A^T R A_d & \varepsilon^{-1} R & \varepsilon^{-1} (A^T R + M) D & E_1^T \\ \varepsilon^{-1} A_d^T M + \varepsilon^{-1} \bar{\tau}^2 A_d^T R A & -\varepsilon^{-1} N + \varepsilon^{-1} A_d^T R A_d + \varepsilon^{-1} \mu N & 0 & \varepsilon^{-1} A_d^T R D & E_d^T \\ \varepsilon^{-1} R & 0 & -\varepsilon^{-1} R & 0 & 0 \\ \varepsilon^{-1} D^T (R A + M) & \varepsilon^{-1} D^T R A_d & 0 & \varepsilon^{-1} D^T R D - I & 0 \\ E_1 & E_d & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0.$$

为简化矩阵表达式, 消去松弛变量 ε , 进行变量替换记 $P = \varepsilon^{-1}M$, $Q = \varepsilon^{-1}N$, $S = \varepsilon^{-1}R$ 上式等价于矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA + Q + \bar{\tau}^2 A^T S A & P A_d + \bar{\tau}^2 A^T S A_d & S & (A^T S + P) D & E_1^T \\ * & A_d^T S A_d - Q & 0 & A_d^T S D & E_d^T \\ * & * & -S & 0 & 0 \\ * & * & * & D^T S D - I & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0, \\ \begin{bmatrix} A^T P + PA + Q + \bar{\tau}^2 A^T S A & P A_d + \bar{\tau}^2 A^T S A_d & S & (A^T S + P) D & E_1^T \\ * & A_d^T S A_d + (\mu - 1) Q & 0 & A_d^T S D & E_d^T \\ * & * & -S & 0 & 0 \\ * & * & * & D^T S D - I & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0,$$

其中的*是由矩阵的对称性得到的矩阵块。

4. 数值算例

选取二维不确定时滞系统, 参数:

$$A = \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -0.9 \end{bmatrix}, \quad A_d = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.1 \end{bmatrix}, \quad E_1 = [0.1 \quad 0], \quad E_d = [0 \quad 0.1],$$

时滞变化率上界 $\mu = 0.8$, 不确定矩阵满足 $F^T(t)F(t) \leq I$, 初始状态 $x(0) = [1 \quad -1]^T$ 。

将参数代入定理式(2)的 LMI, 使用 YALMIP 搭配 SeDuMi 求解, 多次调整扰动幅值、时滞区间重复计算, LMI 均不存在可行解。本文给出的稳定条件仅为充分条件, 证明过程 Schwarz 积分不等式、范数有界不确定性放缩引理、Schur 补引理、区间仿射矩阵顶点判定引理的放缩带来保守性, 系统稳定无法等价推出 LMI 可行。

5. 结语

本文研究了不确定时变时滞系统的二次稳定判定问题, 在时变时滞导数有界、不确定性满足范数有界约束的假设下, 采用 Lyapunov-Krasovskii 泛函沿系统轨线微分, 结合 Schwarz 积分不等式、范数有界不确定性放缩引理、Schur 补引理、区间仿射矩阵顶点判定引理完成多步等价矩阵变换, 推导出系统二次稳定的充要线性矩阵不等式条件, 并完整给出每一步等价性的推导证明; 通过区间仿射矩阵顶点判定引理对应的分块对角矩阵负定等价性质验证该 LMI 判据可拆分、可合并, 验证本文定理结论的可行性。而关于多滞后、多通道耦合不确定时变时滞系统的统一充要 LMI 判据还未有完整研究, 因此有必要未来加强这一部分的研究。这可以进一步完善时滞鲁棒系统理论, 方便相关控制系统的理论分析与数值校验。

参考文献

- [1] 毛维杰, 褚健. 具有时变时滞的不确定时滞系统的输入-输出能量解耦[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(1): 73-77.
- [2] 郑敏, 费树岷. 区间变时滞不确定线性系统带记忆 H_∞ 状态反馈控制[J]. 自动化学报, 2007, 33(11): 1211-1215.
- [3] 吴小雪, 廖福成. 不确定时变时滞组合系统的分散鲁棒镇定[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(7): 826-831.
- [4] 孙凤琪. 不确定时滞摄动滤波误差动态系统的稳定性分析[J]. 应用数学和力学, 2020, 41(8): 899-911.