

控制与决策

Control and Decision

非匹配不确定性影响下的无人车路径跟踪控制

张守武, 李擎, 王恒, 吕萌

引用本文:

张守武, 李擎, 王恒, 等. 非匹配不确定性影响下的无人车路径跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(1): 160–166.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1069>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[航天器输入受限的鲁棒自适应姿态跟踪控制](#)

Robust adaptive attitude tracking control of spacecraft with constrained inputs
控制与决策. 2021, 36(9): 2297–2304 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0013>

[磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制](#)

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor
控制与决策. 2021, 36(6): 1449–1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

[输入受限的多旋翼无人机轨迹跟踪鲁棒正定不变集设计](#)

Design of robust positively invariant set for trajectory tracking of multi-rotor UAV with input saturation
控制与决策. 2021, 36(4): 857–866 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0880>

[直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制](#)

Adaptive fuzzy sliding mode control for magnetic suspension system of linear synchronous motor
控制与决策. 2021, 36(3): 693–698 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0774>

[考虑气动效应不确定性的气动辅助变轨制导算法](#)

Aeroassisted orbital transfer robust guidance method considering atmosphere effect uncertainty
控制与决策. 2020, 35(11): 2773–2779 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0333>

非匹配不确定性影响下的无人车路径跟踪控制

张守武^{1,2}, 李擎^{1,3}, 王恒^{1†}, 吕萌¹

(1. 北京科技大学 自动化学院, 北京 100083; 2. 北京城市学院 信息学部, 北京 100083;
3. 北京科技大学 顺德研究生院, 广东 佛山 528300)

摘要: 针对无人车在非匹配不确定性影响下的路径跟踪控制问题, 设计一种基于线性矩阵不等式 (LMI) 的滑模控制器. 首先, 根据车辆运动学和动力学方程, 同时考虑轮胎侧滑造成的不确定性、车辆侧偏约束以及随机干扰影响, 建立车辆非线性不确定系统模型; 然后, 提出一种线性滑模路径跟踪控制方法, 给出线性滑模面存在的充分条件, 并推导出线性滑模面存在的显式公式, 以保证约束于该滑模面的降阶等价系统的二次稳定性; 最后, 在 Serret-Frenet 坐标系下验证车辆单、双移线运动时的路径跟踪控制效果. 仿真结果表明, 所设计的滑模控制器可以保证对参考路径的稳定跟踪, 具有较强的鲁棒性.

关键词: 非匹配不确定性; 横向控制; 滑模控制; 线性矩阵不等式; Serret-Frenet 坐标系

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyj.2020.1069

引用格式: 张守武, 李擎, 王恒, 等. 非匹配不确定性影响下的无人车路径跟踪控制 [J]. 控制与决策, 2022, 37(1): 160-166.

Path following control for autonomous vehicles with mismatched uncertainties

ZHANG Shou-wu^{1,2}, LI Qing^{1,3}, WANG Heng^{1†}, LYU Meng¹

(1. School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Information Science and Engineering, Beijing City University, Beijing 100083, China; 3. School of Shunde Graduate, University of Science and Technology Beijing, Foshan 528300, China)

Abstract: In this paper, a sliding mode controller based on linear matrix inequality (LMI) is designed to solve the path tracking problem for autonomous vehicle systems with mismatched uncertainties. Firstly, the nonlinear uncertain system model is established based on the vehicle kinematics and dynamics equations, taking into account the uncertainties caused by tire sideslip and random interference etc. Then, a linear sliding mode path tracking control method is proposed for the linearized model. Sufficient conditions for the existence of a linear sliding surface are obtained by the aid of LMIs, and an explicit formula for the existence of a linear sliding surface is presented, which guarantees the quadratic stability of the reduced-order system. Finally, under the serret-Frenet coordinate system, the effectiveness of the proposed method is verified. Simulation results show that the desired path is tracked accurately and robustly with the designed controller.

Keywords: mismatched uncertainty; lateral control; sliding mode control; LMI; Serret-Frenet coordinate

0 引言

无人车是当今汽车工业发展的重要方向之一, 它的推广应用可以有效解决环境污染、交通堵塞问题并提高交通安全^[1]. 近年来, 在国内外科研院所以及一些互联网公司的推动下, 无人驾驶技术得到了快速发展. 无人驾驶技术涵盖多个学科, 集自动控制、人工智能、视觉计算于一体, 其核心技术包括环境感知、车

辆定位、路径规划以及路径跟踪控制等. 可靠的无人车路径跟踪控制可以保证无人车按指定路径行驶, 是无人驾驶技术的关键技术问题之一. 目前比较常见的路径跟踪控制算法有最优预瞄控制^[2]、 H_∞ 控制^[3]、模型预测控制^[4]、自适应控制^[5]、模糊控制^[6] 以及滑模控制^[7] 等.

当无人车以较高速度行驶时, 轮胎的滑移、车辆

收稿日期: 2020-08-01; 录用日期: 2020-11-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62173029); 北京科技大学顺德研究生院科技创新专项基金项目 (BK19BE022); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (FRF-DF-20-35, FRF-BD-19-002A).

责任编辑: 郭戈.

†通讯作者. E-mail: hengwang@ustb.edu.cn.

的侧倾等非线性因素影响使无人车的路径跟踪控制问题变得非常复杂。滑模控制因其具有快速收敛性和对参数变化的不敏感性,被广泛应用于车辆路径跟踪控制中^[8-10]。需要指出的是,传统的滑模控制方法在处理系统不确定性时要求满足匹配条件,而实际系统往往受到非匹配不确定性因素的影响^[11]。为处理非匹配不确定性,文献[12]结合自适应反步法,设计了非奇异快速终端滑模控制方法。文献[13]设计了自适应二阶滑模控制方法,可以实现输出反馈控制。文献[14]结合自学习干扰观测器和滑模控制策略处理系统的时变非匹配不确定性。文献[15]针对非匹配不确定和状态时滞扰动影响下的车道线保持问题,忽略路面侧倾、俯仰、风速等外部扰动,设计了自校正滑模控制方法,使系统对非匹配不确定性以及状态时滞具有完全不变性。

本文针对无人车路径跟踪控制问题受系统非匹配不确定性影响,同时考虑轮胎侧滑的影响,提出一种基于线性矩阵不等式技术的滑模控制器设计方法。给出保证滑模面存在的充分条件,同时设计保证闭环系统二次稳定的滑模控制率。仿真实验对无人车单、双移线运动过程进行了分析,结果验证了所提出方法的有效性。

1 系统模型和问题描述

1.1 路径跟踪模型

无人车路径跟踪如图1所示。 $\{E\}$ 为大地坐标系, $\{S\}$ 为Serret-Frenet坐标系, $\{B\}$ 为车体坐标系; v_x 、 v_y 为车体坐标系下的横向速度和纵向速度; σ 为弧长, $\rho(\sigma)$ 为弧长 σ 处的曲率,即目标路径; e 为车辆质心 M 到目标点 T 的距离; ψ_d 为目标路径航向角, ψ_h 为车辆航向角; $\psi_e = \psi_h - \psi_d$ 为车辆航向角偏差; $r = \dot{\psi}_h$ 为车辆航向角导数,因此航向角偏差的导数为 $r_e = \dot{\psi}_e = \dot{\psi}_h - \dot{\psi}_d$ 。

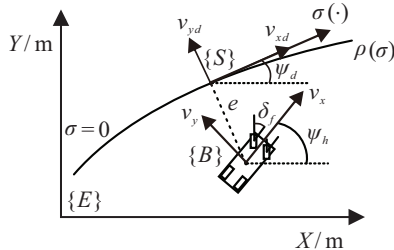


图1 路径跟踪示意图

假设以下条件成立:

- 1) 车辆沿车体坐标系保持横向速度 v_x 恒定;
- 2) 车辆航向角偏差 ψ_e 足够小;
- 3) 车辆侧偏角 β 足够小。

由文献[16]可知,车辆在Serret-Frenet坐标系下的路径跟踪运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{e} = v_x \sin \psi_e + v_y \cos \psi_e, \\ \dot{\psi}_e = r - \rho(\sigma)\dot{\sigma}. \end{cases} \quad (1)$$

以下 $\rho(\sigma)$ 简写为 ρ 。当假设1)成立时, $\dot{\sigma} = v_x$ 。因此当假设2)成立时,式(1)简化为

$$\begin{cases} \dot{e} = v_x \psi_e + v_y, \\ \dot{\psi}_e = r - \rho v_x = r_e. \end{cases} \quad (2)$$

1.2 车辆模型

在车辆的前轮转角较小的情况下,车辆模型可以简化为自行车模型,如图2所示。其中: β 为车辆侧偏角, m 为车辆的质量, I_z 为车辆的转动惯量, l_f 、 l_r 分别为前后轮中心到车辆质心的距离, F_{yf} 、 F_{yr} 为前后轮胎的横向力。

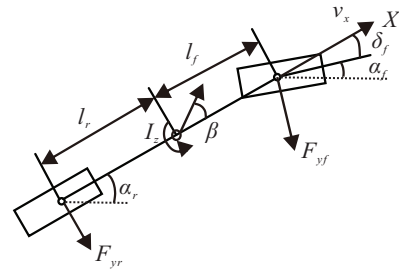


图2 车辆模型

由文献[17]可知,车辆的动力学模型为

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \frac{1}{mv_x}(F_{yf} + F_{yr}) - r_e - \rho v_x, \\ \dot{r}_e = \frac{1}{I_z}(l_f F_{yf} - l_r F_{yr}) - \dot{\rho} v_x. \end{cases} \quad (3)$$

F_{yf} 、 F_{yr} 满足

$$F_{yf} = C_f \alpha_f, \quad F_{yr} = C_r \alpha_r. \quad (4)$$

其中: C_f 、 C_r 分别为前后轮胎的转向刚度值; α_f 、 α_r 为前后轮胎的侧滑角,即

$$\alpha_f = \delta_f - \frac{l_f r}{v_x}, \quad \alpha_r = \frac{l_r r}{v_x} - \frac{v_y}{v_x}. \quad (5)$$

由 $\tan \beta = v_y/v_x$ 可知,当假设3)成立时, $\beta = v_y/v_x$ 。因为 v_x 是常数,可得 $\dot{\beta} = \dot{v}_y/v_x$ 。无人车动力学模型(3)改写为

$$\begin{cases} \dot{\beta} = a_{11}\beta + a_{12}r_e + b_1\delta_f + a_{12}\rho v_x, \\ \dot{r}_e = a_{21}\beta + a_{22}r_e + b_2\delta_f + a_{22}\rho v_x - \dot{\rho} v_x. \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$a_{11} = -\frac{C_f + C_r}{mv_x}, \quad a_{12} = -\left(1 + \frac{l_f C_f - l_r C_r}{mv_x^2}\right),$$

$$b_1 = \frac{C_f}{mv_x^2};$$

$$a_{21} = \frac{l_f C_f + l_r C_r}{I_z}, \quad a_{22} = -\frac{l_f^2 C_f + l_r^2 C_r}{I_z v_x},$$

$$b_2 = \frac{l_f C_f}{I_z}.$$

综上,无人车状态方程为

$$\begin{cases} \dot{e} = v_x \psi_e + v_x \beta, \\ \dot{\psi}_e = r - \rho v_x = r_e, \\ \dot{\beta} = a_{11} \beta + a_{12} r_e + b_1 \delta_f + a_{12} \rho v_x, \\ \dot{r}_e = a_{21} \beta + a_{22} r_e + b_2 \delta_f + a_{22} \rho v_x - \dot{\rho} v_x. \end{cases} \quad (7)$$

定义状态向量 $x(t) = [e, \psi_e, \beta, r_e]^T$, 控制输入 $u(t) = \delta_f$, 干扰 $f(x, t) = [d_1, d_2, d_3 + a_{12} \rho v_x, d_4 + a_{22} \rho v_x - \dot{\rho} v_x]^T$, 其中 d_1, d_2, d_3, d_4 为外界干扰. 式(7)可以改写为

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t) + B_0 u(t) + f(x, t). \quad (8)$$

其中

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & v_x & v_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_{11} & a_{12} \\ 0 & 0 & a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$B_0 = [0, 0, b_1, b_2]^T$. 由于轮胎的转向刚度值会随着车辆和路面状态的不同而变化,有

$$C_f = C_{0f} + \lambda_f \tilde{C}_f, \quad C_r = C_{0r} + \lambda_r \tilde{C}_r, \quad (10)$$

其中 $\lambda_{f,r}$ 为时变参数且满足 $|\lambda_i| \leq 1, i = f, r$. 定义 C_{0f}, C_{0r} 为 C_f, C_r 的正常值,有

$$A_0 = A + \Delta A, \quad B_0 = B + \Delta B. \quad (11)$$

其中: A, B 为 A_0, B_0 的正常值, $\Delta A, \Delta B$ 为系统的不确定性,且 ΔA 不满足匹配条件. 不失一般性,假设

$$\Delta A = DF(x, t)E, \quad \|F(x, t)\| \leq 1, \quad (12)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{mv_x} & -\frac{1}{mv_x} \\ 0 & 0 & -\frac{l_f}{I_z} & -\frac{l_r}{I_z} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_f & \frac{l_f C_f}{v_x} \\ 0 & 0 & C_r & \frac{l_r C_r}{v_x} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$f(x, t) = Bh(x, t), \quad \Delta B(x, t) = BY(x, t), \quad (15)$$

$$\eta(x, u, t) = h(x, t) + Y(x, t)u(x, t). \quad (16)$$

假设存在已知常数 φ, ζ 对于所有的 $(x, t) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$, 满足

$$\|h(x, t)\| \leq \varphi, \quad \|Y(x, t)\| \leq \zeta. \quad (17)$$

式(8)可以改写为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + DF(x, t)Ex(t) + \\ &B[u(t) + \eta(x, u, t)]. \end{aligned} \quad (18)$$

本文主要的任务是,针对无人车路径跟踪模型(18),设计滑模控制器保证闭环系统稳定,使无人车沿给定路径运行,同时抑制模型不确定性和外界干扰的影响.

注1 按照文献[11]的定义,若 $\Delta A = B\tilde{A}$, 其中 $\|\tilde{A}\| \leq \theta$, θ 为已知常数,则系统称为匹配系统;若不满足上述条件,则称为非匹配系统. 当模型(18)满足匹配条件时,可转化为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B[\tilde{A} + u(t) + \eta(x, u, t)] = \\ &Ax(t) + Bv. \end{aligned}$$

若 (A, B) 可控,则可以通过极点配置、二次最优等传统方法求得 v , 从而求得控制律 $u(t)$. 需要指出的是,实际中非匹配不确定性更具有一般性,且上述传统方法无法有效求解.

2 滑模控制器设计

通过设计滑模控制器 $u(t)$, 使系统状态收敛于滑模面. 考虑路径跟踪模型(7),为使 e, ψ_e 在有限时间内趋向于零,定义滑模面为

$$\kappa = \{x : \Omega(x) = Sx = 0, S = B^T X^{-1}\}. \quad (19)$$

定理1给出系统状态到达滑模面并维持在滑模面上的充分条件;定理2给出保证系统从任意点到达滑模面并维持在滑模面的控制率.

定理1 对于系统(18),若存在对称正定矩阵 X , 使得矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} \tilde{B}^T A X \tilde{B} + \tilde{B} X A^T \tilde{B} + \tilde{B}^T D D^T \tilde{B} & \tilde{B}^T X E^T \\ EX \tilde{B} & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (20)$$

成立,则当系统状态达到滑模面并维持在滑模面时,系统稳定. 其中 \tilde{B} 为 B 的正交向量,满足 $\tilde{B}^T B = 0$.

证明 定义转换矩阵

$$M = \begin{bmatrix} \tilde{B}^T \\ \tilde{B}^T X^{-1} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

定义变量

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = Mx. \quad (22)$$

从式(22)可知 $z_2 = \tilde{B}^T X^{-1} x = Sx = \Omega$. 式(18)两边同乘 M , 得到

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{\Omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ S \end{bmatrix} [u + \eta(x, u, t)]. \quad (23)$$

其中

$$\begin{aligned} A_{11} &= \tilde{B}^T [A + DF(x, t)E] X \tilde{B} (\tilde{B}^T X \tilde{B})^{-1}, \\ A_{12} &= \tilde{B}^T [A + DF(x, t)E] B (SB)^{-1}, \\ A_{21} &= S [A + DF(x, t)E] X \tilde{B} (\tilde{B}^T X \tilde{B})^{-1}, \\ A_{22} &= S [A + DF(x, t)E] B (SB)^{-1}. \end{aligned} \quad (24)$$

当系统位于滑模面时, $\dot{\Omega} = \Omega = 0$, 由式(23)可知

$$\dot{z}_1 = A_{11} z_1, \quad (25)$$

其中 $z_1 = \tilde{B}^T x$. 式(25)稳定的充分条件是存在 P_0 , 使得 $A_{11} P_0^T + A_{11}^T P_0 < 0$ 成立. 将 A_{11} 代入, 并令 $P_0 = \tilde{B}^T X \tilde{B}$, 可得

$$\begin{aligned} &\tilde{B}^T A X \tilde{B} + \tilde{B} X A^T \tilde{B} + \\ &\tilde{B}^T D D^T \tilde{B} + \tilde{B}^T X E^T E X \tilde{B} < 0. \end{aligned} \quad (26)$$

应用Schur补引理^[18], 式(26)等价于(20). \square

注2 定理1给出了系统稳定的充分条件, 这里 ΔA 只需要满足有界条件, 不需要满足匹配条件.

定理2 给定系统(18), 设计控制律为

$$u(t) = \begin{cases} -(SB)^{-1} S A x - \frac{1}{1-\zeta} (\varepsilon + \varphi + \|(SB)^{-1} S A x\| + \\ \|(SB)^{-1} S D\| \|E x\|) \frac{\Omega}{\|\Omega\|}, & \|\Omega\| \neq 0; \\ -(SB)^{-1} S A x, & \|\Omega\| = 0. \end{cases}$$

系统可从任意状态收敛并维持在滑模面(19)上.

证明 设Lyapunov函数

$$V = \frac{1}{2} \Omega^T (B^T X^{-1} B)^{-1} \Omega > 0. \quad (27)$$

有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} \frac{d}{dt} [\Omega^T (B^T X^{-1} B)^{-1} \Omega] \leq \\ &\Omega^T (SB)^{-1} S A x + \Omega^T u + \\ &\Omega^T [\eta(x, u, t) + (SB)^{-1} S D F(x, t) E x]. \end{aligned} \quad (28)$$

因为

$$\begin{aligned} &\Omega^T [\eta(x, u, t) + (SB)^{-1} S D F(x, t) E x] \leq \\ &\|\Omega\| (\|\eta(x, u, t)\| + \|(SB)^{-1} S D\| \|F(x, t)\| \|E x\|) \leq \\ &\|\Omega\| (\|\eta(x, u, t)\| + \|(SB)^{-1} S D\| \|E x\|), \end{aligned} \quad (29)$$

且

$$\|\eta(x, u, t)\| = \|h(x, t) + Y(x, t)u(t)\| \leq \varphi + \zeta \|u\|, \quad (30)$$

所以有

$$\begin{aligned} \|u(t)\| &\leq \|(SB)^{-1} S A x\| + \frac{1}{1-\zeta} (\varepsilon + \varphi + \\ &\|(SB)^{-1} S A x\| + \|(SB)^{-1} S D\| \|E x\|), \end{aligned}$$

$$\|\eta(x, u, t)\| \leq$$

$$\begin{aligned} &\frac{1}{1-\zeta} (\zeta \varepsilon + \varphi + \zeta(2-\zeta) \|(SB)^{-1} S A x\| + \\ &\zeta \|(SB)^{-1} S D\| \|E x\|). \end{aligned}$$

由式(28)可知

$$\dot{V} \leq \Omega^T (SB)^{-1} S A x + \Omega^T u +$$

$$\|\Omega\|^T (\|\eta(x, u, t)\| + \|(SB)^{-1} S D\| \|E x\|) -$$

$$\frac{1}{1-\zeta} [\varepsilon + \varphi + \|(SB)^{-1} S A x\| +$$

$$\|(SB)^{-1} S D\| \|E x\|] \|\Omega\| +$$

$$\|(SB)^{-1} S D\| \|E x\| \|\Omega\| +$$

$$\frac{1}{1-\zeta} (\zeta \varepsilon + \varphi + \zeta(2-\zeta) \|(SB)^{-1} S A x\|) +$$

$$\zeta \|(SB)^{-1} S D\| \|E x\| \|\Omega\| =$$

$$-(1-\zeta) \|(SB)^{-1} S A x\| \|\Omega\| - \varepsilon \|\Omega\| \leq 0. \quad \square$$

注3 定理2给出的控制律 $u(t)$ 可以使系统从任意状态收敛并维持在滑模面上, 保证闭环系统稳定. 此外, 为减小滑模控制率造成的高频抖振现象, 将定理2控制律中的 $\frac{\Omega}{\|\Omega\|}$ 用 $\frac{\Omega}{\|\Omega\| + \gamma}$ 替代, 其中 γ 为非负极小数^[19].

3 仿真实验

本节通过无人车单移线和双移线运动仿真实例验证所提出方法的有效性. 为了与已有方法进行比较, 仿真中车辆参数和道路参数与文献[3]参数一致, 参数为: $m = 1500 \text{ kg}$, $I_z = 2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $l_s = 0.8 \text{ m}$, $l_f = 1.3 \text{ m}$, $l_r = 1.4 \text{ m}$, $C_f = 40000 \text{ N/rad}$, $C_r = 40000 \text{ N/rad}$, 车辆转向刚度的不确定为正常值的20%. 假设 $f(x, t) = 0.01 \sin(0.5\pi t) B$, $\Delta B = 0.5 \sin(0.5\pi t) B$, $\tilde{B} = [1, 1, 0, 0]$. 通过求解线性矩阵不等式(20), 可得

$$X = \begin{bmatrix} 1.0796 & -0.367 & 0 & 0 \\ -0.367 & 0.3457 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0796 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0796 \end{bmatrix}.$$

以及相应的滑模控制率.

3.1 单移线运动控制

设无人车以25 m/s的速度在路面上完成一次单移线运动, 图3给出了单移线运动路径的曲率.

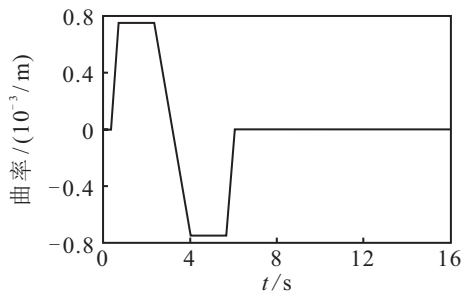


图3 单移线运动路径曲率

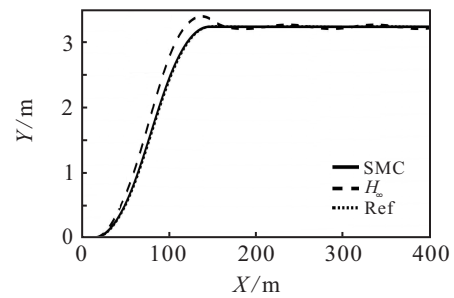
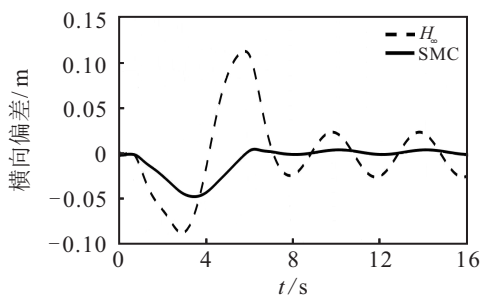


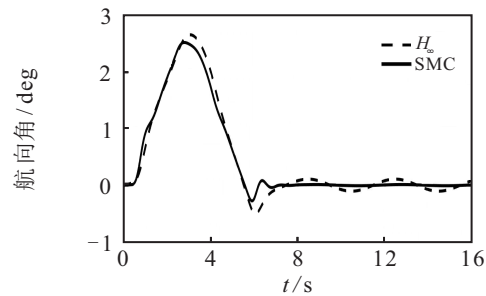
图4 单移线运动路径跟踪效果

图4为应用本文滑模方法(SMC表示)和文献[3]提出的鲁棒 H_∞ 控制方法(H_∞ 表示)时,大地坐标下车辆目标路径与实际车辆行驶路径的比较,其中点线表示目标路径(Ref表示).由图5可见,本文设计的滑模控制方法可以取得更好的路径跟踪效果.

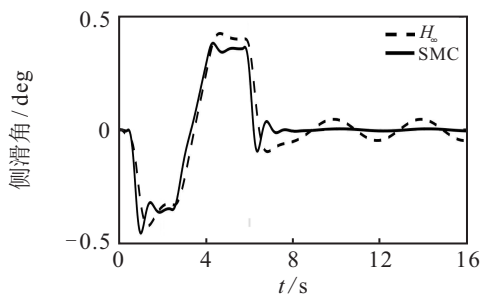
图5为单移线运动控制时横向偏差、航向角偏差、侧偏角、航向角偏差率、前轮转角的仿真结果.可以看出,在单移线运动过程中,应用所提出滑模控制方法得到的横向偏差、航向角偏差、侧偏角、航向角偏差率,其幅度都明显小于文献[3]的 H_∞ 控制方法.



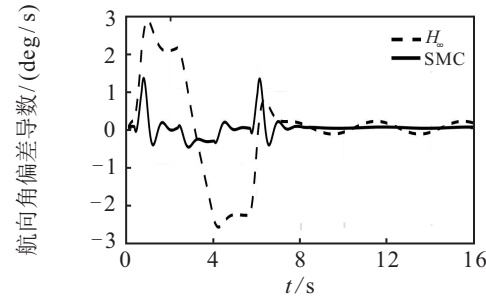
(a) 横向偏差随时间变化



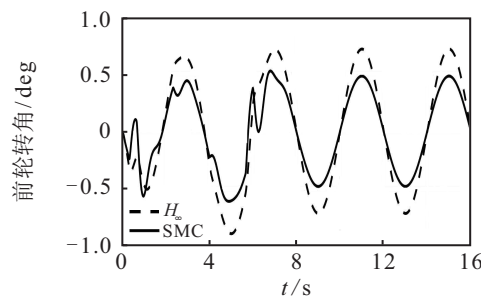
(b) 航向角随时间变化



(c) 侧滑角随时间变化



(d) 航向角偏差导数随时间变化



(e) 前轮转角随时间变化

图5 车辆单移线运动控制的仿真结果

3.2 双移线运动控制

图6为双移线运动过程中路径曲率的变化曲线.可以看出,预先设定的路曲率存在一些阶跃变化,从而模拟更加恶劣的驾驶条件.

图7为大地坐标下车辆对参考路径的跟踪效果,

可以看出,应用所提出滑模控制方法得到的路径跟踪精度明显优于文献[3]提出的 H_∞ 控制方法.

图8为双移线运动控制时横向偏差、航向角偏差、侧偏角、航向角偏差率的仿真结果.可以看出,在双移线运动过程中,应用所提出滑模控制方法其横向

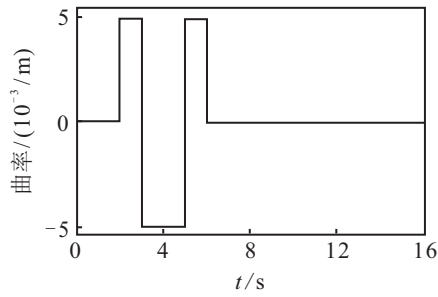


图6 双移线运动路径曲率

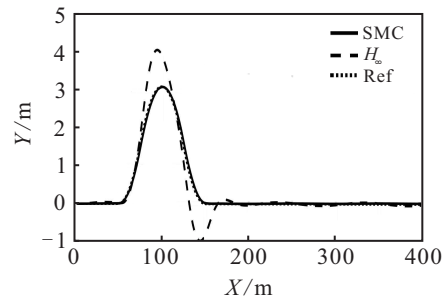
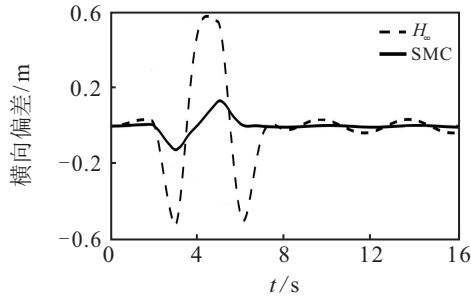
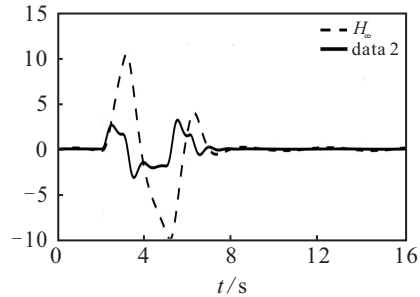


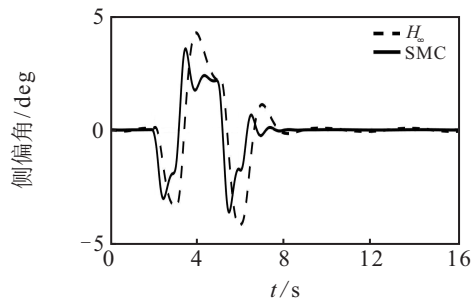
图7 双移线运动路径跟踪效果



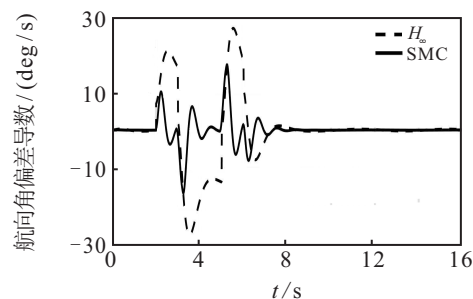
(a) 横向偏差随时间变化



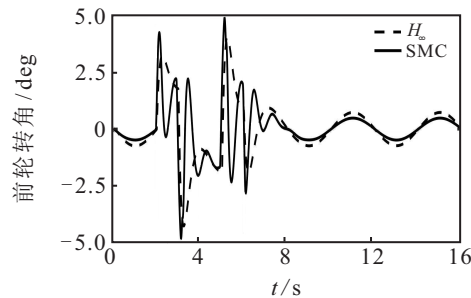
(b) 航向角随时间变化



(c) 侧偏角随时间变化



(d) 航向角偏差导数随时间变化



(e) 前轮转角随时间变化

图8 车辆双移线运动控制的仿真结果

偏差、航向角偏差、侧偏角、航向角偏差率都明显小于文献[3]提出的 H_∞ 控制方法. 由于参考路径曲率在第2、3、5、6s时有阶跃性变化,由图8可以看出,车辆航向角导数有大幅度变化以完成车辆的急剧转弯;由图7可以看出,在车辆急剧转弯的情况下,滑模控制器依然可以控制车辆完成对参考路径的精确跟踪.

4 结论

本文针对非匹配不确定性影响下的无人车路径跟踪控制问题,提出一种基于线性矩阵不等式的滑模

控制方法,给出了滑模面存在的充分条件,同时设计了保证系统稳定的滑模控制率,使系统对于非匹配不确定性因素具有完全不变性. 仿真结果验证了所提出方法的有效性.

参考文献(References)

[1] 陈慧岩, 陈舒平, 龚建伟. 智能汽车横向控制方法研究综述[J]. 兵工学报, 2017, 38(6): 1203-1214.
(Chen H Y, Chen S P, Gong J W. A review on the research of lateral control for intelligent vehicles[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(6): 1203-1214.)
[2] 邱少林, 钱立军, 陆建辉. 基于最优预瞄的智能车变道

- 控制[J]. 中国机械工程, 2019, 30(23): 2778-2783.
(Qiu S L, Qian L J, Lu J H. Lane-change control for intelligent vehicles based on optimal preview[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(23): 2778-2783.)
- [3] Wang R R, Jing H, Hu C, et al. Robust H_∞ path following control for autonomous ground vehicles with delay and data dropout[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(7): 2042-2050.
- [4] 史恩秀, 黄玉美, 郭俊杰, 等. 自主导航小车 (AGV) 轨迹跟踪的模糊预测控制[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(5): 592-596.
(Shi E X, Huang Y M, Guo J J, et al. Fuzzy predictive control for trajectory tracking of a wheeled mobile robot[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(5): 592-596.)
- [5] 顾万里, 胡云峰, 宫洵, 等. 考虑参数不确定性的移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(1): 81-88.
(Gu W L, Hu Y F, Gong X, et al. Trajectory tracking control of mobile robot with parameter uncertainties[J]. Control and Decision, 2019, 34(1): 81-88.)
- [6] Dian S Y, Han J X, Guo R, et al. Double closed-loop general type-2 fuzzy sliding model control for trajectory tracking of wheeled mobile robots[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2019, 21(7): 2032-2042.
- [7] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407-418.
(Liu J K, Sun F C. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(3): 407-418.)
- [8] Chih L H, Yang C Y, John Y H. Path tracking of an autonomous ground vehicle with different payloads by hierarchical improved fuzzy dynamic sliding-mode control[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(2): 899-914.
- [9] Wu Y, Wang L F, Zhang J Z, et al. Path following control of autonomous ground vehicle based on nonsingular terminal sliding mode and active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(7): 6379-6390.
- [10] Yang L, Yue M, Ma T. Path following predictive control for autonomous vehicles subject to uncertain tire-ground adhesion and varied road curvature[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2019, 17(1): 193-202.
- [11] 高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990: 210-219.
(Gao W B. Basic theory of variable structure control[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1990: 210-219.)
- [12] 李浩, 窦丽华, 苏中. 非匹配不确定系统的自适应反步非奇异快速终端滑模控制[J]. 控制与决策, 2012, 27(10): 1584-1587.
(Li H, Dou L H, Su Z. Adaptive backstepping non-singular fast terminal sliding mode control for mismatched uncertain systems[J]. Control and Decision, 2012, 27(10): 1584-1587.)
- [13] Huynh V V, Minh B L N, Nguyen T M, et al. Extended second order sliding mode control for mismatched uncertain systems with only output measurable[J]. Advances in Electrical and Electronic Engineering, 2018, 16(4): 435-445.
- [14] Kayacan E. Sliding mode control for systems with mismatched time-varying uncertainties via a self-learning disturbance observer[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2019, 41(7): 2039-2052.
- [15] 李玮, 段建民, 龚建伟. 非匹配不确定和状态时滞扰动下的车道线保持[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(3): 389-394.
(Li W, Duan J M, Gong J W. Vehicle lane-keeping control under state time-delay and mismatched uncertain perturbations[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(3): 389-394.)
- [16] Skjetne R, Fossen T I. Nonlinear maneuvering and control of ships[C]. Proceedings of Oceans 2001 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Honolulu, 2001: 1808-1815.
- [17] 龚建伟, 刘凯, 齐建永. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 第2版. 北京: 北京理工大学出版社, 2020: 40-45.
(Gong J W, Liu K, Qi J Y. Model predictive control for self-driving vehicles[M]. The 2nd edition. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2020: 40-45.)
- [18] 俞立. 鲁棒控制-线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 6-22.
(Yu L. Robust control-treatment of linear matrix inequalities[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 6-22.)
- [19] Choi H H. LMI-based sliding surface design for integral sliding mode control of mismatched uncertain systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(4): 736-742.

作者简介

张守武(1980—), 男, 博士生, 从事鲁棒控制、非线性控制和容错控制的研究, E-mail: zhangshouwu@bcu.edu.cn;

李擎(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、智能优化理论及应用等研究, E-mail: liqing@ies.ustb.edu.cn;

王恒(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 从事无人车可靠控制、同时定位与地图构建等研究, E-mail: hengwang@ustb.edu.cn;

吕萌(2000—), 女, 本科生, 从事无人车智能控制的研究, E-mail: 41923185@xs.ustb.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)