

无人驾驶车辆轨迹跟踪控制研究综述

○ 黄露¹ 曾江²

(1. 宜宾学院 电子信息工程学院, 四川 宜宾 644007; 2. 四川省宜宾普拉斯包装材料有限公司, 四川 宜宾 644007)

摘要: 本文以无人驾驶车辆轨迹跟踪控制为研究对象, 首先分析了无人驾驶车辆的轨迹跟踪控制所需的车辆系统模型, 然后分析了无人驾驶车辆常用的轨迹跟踪控制器的设计。通过分析发现, 目前常用于轨迹跟踪控制的车辆动力学模型为单轨模型, 应用 LQR 控制算法进行轨迹跟踪控制时的状态权重矩阵 Q 和控制权重矩阵 R 的选取较为重要, 纯跟踪算法在低速工况时的轨迹跟踪效果较好, 线性时变模型预测控制相比于非线性模型预测控制的轨迹跟踪效果更好。

关键词: 无人驾驶车辆; 轨迹跟踪; 控制器设计

中图分类号: U461 DOI: 10.20042/j.cnki.1009-4903.2025.03.001

A Review of Research on Trajectory Tracking Control of Unmanned Vehicles

Abstract: In this paper, taking the trajectory tracking control of unmanned vehicles as the research object, firstly, the vehicle system model required for the trajectory tracking control of unmanned vehicles is analyzed. Then, the design of the trajectory tracking controller commonly used in unmanned vehicles is analyzed. It is found that the vehicle dynamics model commonly used for trajectory tracking control is a monorail model. The selection of Q and R is more important when applying the LQR control algorithm for trajectory tracking control. The pure tracking algorithm has a good trajectory tracking effect in low-speed conditions. Linear time-varying model predictive control has better trajectory tracking than nonlinear model predictive control.

Key words: Unmanned vehicles; Trajectory tracking; Controller design

(注: 宜宾学院校级培育项目:《考虑侧倾稳定性的无人驾驶车辆模型预测控制》(基金项目), 课题编号: 2021PY19。)

0 引言

无人驾驶车辆在未来的智能交通系统中有着广阔的应用前景。无人驾驶车辆在进行轨迹跟踪时, 要求自身在规定时间内达到某一预先设定好的参考路径点。轨迹跟踪是无人驾驶车辆领域的关键技术之一, 其目的是通过控制无人驾驶车辆的前轮转向, 保证车辆按照参考的轨迹行驶。轨迹跟踪需要在满足车辆动力学约束的前提下尽可能减少实际轨迹与参考轨迹之间的偏差。本文以无人驾驶车辆轨迹跟踪控制为研究对象, 分析其车辆动力学模型的搭建和控制器设计方式。

1 轨迹跟踪模型

车辆动力学模型分析对无人驾驶车辆的轨迹跟踪控制研究十分重要。建立合理的车辆系统模型是设计轨迹跟踪控制器的前提和基础。用于轨迹跟踪的车辆系统模型只需要表现出车辆的运动学和动力学约束。复杂的车辆系统模型不是轨迹跟踪控制的研究重点, 源于它会增加轨迹跟踪控制器的计算负担。

搭建考虑横向和横摆的二自由度车辆动力学模型, 同时选用魔术公式作为车辆动力学模型; 搭建包含纵向、横向和横摆

的三自由度车辆系统动力学模型, 同时搭建考虑轮胎侧偏特性的轮胎模型; 搭建高速等效车辆动力学模型, 即搭建一种小角度假设下的车辆动力学模型, 同时搭建 Brush 轮胎模型用以计算侧向力; 搭建考虑侧倾的车辆动力学模型, 同时搭建基于魔术公式的车辆轮胎模型; 搭建考虑曲率的车辆动力学模型, 同时考虑轮胎的侧偏特性; 搭建车辆预瞄误差模型和考虑路面地形的高速车辆等效动力学模型, 同时考虑道路曲率地形因素。

常用的车辆三自由度动力学模型^[1], 表示如下:

$$\begin{cases} m\ddot{y} = -m\dot{x}\dot{\varphi} + 2[C_{cf}(\delta_f - \frac{y+a\dot{\varphi}}{x}) + C_{cr}\frac{b\dot{\varphi}-\dot{y}}{x}] \\ m\ddot{x} = -m\dot{y}\dot{\varphi} + 2[C_{cf}S_f + C_{cr}S_r + C_{cf}(\delta_f - \frac{a\dot{\varphi}+\dot{y}}{x})] \\ I_z\ddot{\varphi} = 2[aC_{cf}(\delta_f - \frac{a\dot{\varphi}+\dot{y}}{x}) - b] \\ \dot{Y} = v_x \sin \varphi + v_y \cos \varphi \\ \dot{X} = v_x \cos \varphi - v_y \sin \varphi \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, m 为车辆质量; \dot{x} 、 \ddot{x} 、 \dot{y} 和 \ddot{y} 分别为车辆坐标系下的车辆纵向速度、纵向加速度、横向速度和横向加速度; \dot{X}

和 \dot{Y} 分别为大地坐标系下的车辆纵向速度和横向速度； φ 、 $\dot{\varphi}$ 和 $\ddot{\varphi}$ 分别为车辆横摆角、横摆角速度和横摆角加速度； I_z 为车辆转动惯量； a 和 b 分别为质心到车辆前轴和后轴的长度； C_{cf} 、 C_{cr} 、 C_{lf} 和 C_{lr} 分别为前后轮胎的侧向刚度与纵向刚度； S_f 和 S_r 分别为前后轮的滑移率； δ_f 为车辆前轮转角。

通过以上分析发现，目前应用于无人驾驶车辆轨迹跟踪控制的车辆动力学模型的相关研究具有以下特点：

(1) 对于无人驾驶车辆的轨迹跟踪控制而言，车辆动力学模型需要考虑轮胎的侧偏特性。

(2) 近期的相关研究都是采用单轨模型作为轨迹跟踪控制器的车辆动力学模型。在常规工况下使用单轨模型的控制效果与十四自由度车辆动力学模型相差不大，既保证了轨迹跟踪控制的精度，又不存在计算量大的问题。

(3) 对于高速工况下的无人驾驶车辆轨迹跟踪控制，可以搭建小角度假设下的车辆动力学模型。

本文根据目前相关研究，列出了无人驾驶车辆常见的车辆轮胎模型的设计方法，如表 1 所示。

表 1 常见的车辆轮胎模型设计方法

方法及理论	参考文献	特点
魔术轮胎公式	[3,4,5,6]	经验轮胎模型
Brush 轮胎模型	[5,6]	“弹性胎面和刚性胎体”假设的简化理论模型

2 轨迹跟踪控制器设计

设计轨迹跟踪控制器的目标是尽可能减少实际轨迹与参考轨迹之间的偏差。目前常用的轨迹跟踪方法可以分为基于 LQR 控制算法、基于纯跟踪算法和基于模型预测控制算法等 3 类。

2.1 LQR 控制算法

LQR 控制常用于车辆的横向控制中，是求解线性二次型常用的求解方法；LQR 的控制对象是线性系统，所以运用 LQR 进行轨迹跟踪控制需要对车辆模型进行线性化，而目标函数为对象状态和控制输入的二次型函数。LQR 轨迹跟踪控制方法能够在中低速工况下具有较好的控制效果，且具有较好的实时性。

以前轮转角为控制变量，设计一种模糊 LQR 轨迹控制控制器，在不同车速工况下获得了较好的轨迹跟踪效果。将 LQR 控制算法中的状态权重矩阵 Q 和控制权重矩阵 R 设计为动态值，设计改进的 LQR 控制器，在双移线轨迹和连续换道轨迹下获得了较好的轨迹跟踪效果。设计状态权重矩阵 Q 变为权重系数调节的 LQR 轨迹跟踪器，在不同附着系数路面上能够很好地进行轨迹跟踪并保持车辆处于稳定状态。

通过以上分析，可以发现 LQR 最优设计是指状态反馈控制器应使二次型目标函数取最小值，其中的 Q 、 R 选取尤为重要。

2.2 纯跟踪算法

纯跟踪算法是一种典型的横向控制算法。纯跟踪算法的原理是基于当前车辆的后轮中心位置，在参考路径上向前视距离处匹配（自定义）一个预瞄点；假设车辆后轮中心点可以按照一定的转弯半径行驶抵达该预瞄点，然后根据预瞄距离、转弯半径、车辆坐标系下预瞄点的朝向角之间的几何关系来确定前轮转角，进一步达到无人驾驶车辆横向控制的目的。

基于纯跟踪算法设计轨迹跟踪控制器，并进行试验验证，其在低速工况下的横向偏差较小。基于纯跟踪算法设计无人驾驶车辆轨迹跟踪控制器，试验结果表明车辆在低速工况下的轨迹跟踪性能较好，在高速工况下的轨迹跟踪性能较差。设计一种基于滚动预瞄模型的纯跟踪算法的轨迹跟踪控制器，其不同曲率道路上获得了较好的轨迹跟踪效果。

通过以上分析，可以发现，纯跟踪算法在低速工况下的性能较好。

2.3 模型预测控制

模型预测控制算法的优点是可以在控制过程中添加多种约束；因此，模型预测控制算法被广泛用于无人驾驶车辆领域的轨迹跟踪控制。线性时变模型预测控制算法应用较多，非线性模型预测控制存在计算量较大的问题。

原文标记在此处：其目的是通过控制无人驾驶车辆的前轮转向保证车辆按照参考的轨迹行驶。轨迹跟踪需要满足车辆动力学约束的前提下尽可能减少实际轨迹与参考轨迹之间的偏差^[2]。

线性时变模型预测控制控制器的设计，需要对车辆系统模型进行线性化和离散化，进一步设计控制器的目标函数和约束条件，最后对该控制问题进行优化求解。以前轮转角为控制量，将车辆动力学模型线性化和离散化，进一步搭建线性时变模型预测轨迹跟踪控制器，在不同的附着系数和速度工况下获得了较好的轨迹跟踪效果。

(1) 设计一种时域变步长的模型预测轨迹跟踪控制器，控制器考虑了车辆的动力学约束和稳定性约束，可以在高速工况获得较大的预测时域，在高速工况下获得了较好的轨迹跟踪效果；同时将横摆角速度和侧向速度保持在稳定性包络线以内，表明车辆能够在获得较好的跟踪参考轨迹的同时保持车辆处于稳定状态。

(2) 设计一种考虑侧倾约束的模型预测轨迹跟踪控制器，在高速工况下能够很好地进行轨迹跟踪控制，同时能够保持车辆处于稳定性状态。

(3) 设计一种自适应于侧向附着力的线性时变模型预测轨迹跟踪控制方法,能够较好地跟踪双移线轨迹。以前轮转角和纵向加速度为控制变量设计一种线性时变模型预测纵向控制方法,在高速工况下能够较好地跟踪单移线轨迹。

(4) 设计线性时变模型预测控制轨迹跟踪横向控制器、PID纵向控制器和稳定性控制器,在高速工况下能够很好地跟踪双移线轨迹且保持车辆处于稳定状态。

通过以上分析可以发现,目前很多研究表明,无人驾驶车辆轨迹跟踪控制器都是基于线性时变模型预测控制设计的。

本文根据目前的相关研究,列出了无人驾驶车辆常见的轨迹跟踪控制器的设计方法,如表 2 所示。

表 2 常见的无人驾驶车辆轨迹跟踪控制器

控制算法及理论	工作和结论
LQR 控制	状态权重矩阵 Q 和控制权重矩阵 R 的选取较为重要
纯跟踪控制	低速工况跟踪效果较好
模型预测控制	线性时变模型预测轨迹效果较好

通过以上分析发现,目前的相关研究具有以下特点:

(1) 应用 LQR 控制算法进行轨迹跟踪控制时的 Q 和 R 的选取较为重要。

(2) LQR 和纯跟踪算法在低速工况时的轨迹跟踪效果较好。

(3) 目前的很多研究都是基于线性时变模型预测控制设计的轨迹跟踪控制器,非线性模型预测控制对于轨迹跟踪控制而言存在计算大的问题。

3 结语

本文以无人驾驶车辆的轨迹跟踪控制为研究对象,分析了无人驾驶车辆的轨迹跟踪控制所需的车辆系统模型及无人驾驶车辆常用的轨迹跟踪控制器的设计。通过分析研究认为,目前常用的车辆动力学模型为单轨模型,纯跟踪算法在低速工况

时的轨迹跟踪效果较好,LQR 算法的 Q 和 R 设计对于轨迹跟踪而言较为重要,线性时变模型预测控制相比于非线性模型预测控制的轨迹跟踪效果更好。

参考文献

[1] 龚建伟,姜岩,徐威.无人驾驶车辆模型预测控制[M].北京:北京理工大学出版社,2014.

[2] 邹旭东,贾志强,张丽霞.智能车辆路径跟踪与稳定性的模型预测控制[J].济南大学学报(自然科学版),2021,35(04):315-321+328.

[3] 李军,唐爽,周伟.考虑车辆稳定性的模型预测路径跟踪方法[J].华侨大学学报(自然科学版),2019,40(05):574-579.

[4] 刘凯,陈慧岩,龚建伟,等.高速无人驾驶车辆的操控稳定性研究[J].汽车工程,2019,41(05):514-521.

[5] 刘凯,龚建伟,陈舒平,等.高速无人驾驶车辆最优运动规划与控制的动力学建模分析[J].机械工程学报,2018,54(14):141-151.

[6] 刘平,刘自斌,杨明亮,等.考虑道路曲率的多约束高速无人驾驶汽车横向跟踪控制方法[J].长安大学学报(自然科学版),2023,43(02):120-134.

[7] Cheng S, Li L, Chen X, et al. Model-predictive-control-based path tracking controller of autonomous vehicle considering parametric uncertainties and velocity-varying[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(9): 8698-8707.

[8] Liang H, Li H, Xu D. Nonlinear Model Predictive Trajectory Tracking Control of Underactuated Marine Vehicles: Theory and Experiment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(9):1-1.

[9] Hu J, Xiong S, Zha J, et al. Lane detection and trajectory tracking control of autonomous vehicle based on model predictive control[J]. International journal of automotive technology, 2020, 21: 285-295.