doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.01.001

无人驾驶铰接转向车辆路径跟踪控制研究综述

祝青园　程家琪　陈轩伟　杨昌霖　高云龙　邵桂芳
(厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院，厦门 361005)

摘要：路径跟踪是无人驾驶技术的重要组成部分，是实现铰接转向车辆准确平稳自主行驶的关键，对提高铰接转向车辆在农业、林业、矿山及建筑等行业的作业效率和安全性具有重要意义。车辆模型构建、控制算法设计和算法验证评估是路径跟踪控制研究的基础，围绕这 3 方面阐述了铰接转向车辆路径跟踪控制研究的进展。首先回顾了铰接转向车辆的几何学模型、运动学模型和动力学模型，并讨论了各类模型在路径跟踪控制研究中的适用场景及局限性；在此基础上，阐述了铰接转向车辆路径跟踪控制算法的研究现状，对比并总结了每种算法的优缺点及适用范围，并进一步归纳了算法的验证与评估手段；最后展望了铰接转向车辆路径跟踪技术未来的研究重点及方向：考虑车辆动力学因素及模型参数动态时变特性的车辆建模研究；融合各类算法适应性并结合智能算法的多工况自适应控制算法设计；标准化、流程化的高保真仿真场景开发及集成准确性、稳定性、安全性等多性能的评估方法研究。

关键词：无人驾驶；铰接转向车辆；路径跟踪；控制策略；动力学模型；验证评估
中图分类号：S22；TD4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)01-0001-21　　**OSID**：

Review on Path Tracking Control of Unmanned Articulated Steering Vehicles

ZHU Qingyuan　CHENG Jiaqi　CHEN Xuanwei　YANG Changlin　GAO Yunlong　SHAO Guifang
(*Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology*, *Xiamen University*, *Xiamen* 361005, *China*)

Abstract: The path tracking of unmanned articulated steering vehicles is the key to accurately and smoothly carrying out operational tasks, which can effectively improve the operational efficiency and safety of articulated steering vehicles in industries such as agriculture, forestry, mining, and construction. The research on path tracking control typically included three aspects: vehicle model construction, control algorithm design, and algorithm validation and evaluation, from which the research progress of path tracking control technology for articulated steering vehicles was systematically analyzed. Firstly, the geometric, kinematic, and dynamic models of articulated steering vehicles were reviewed, and then the applicable scenarios and limitations of these models in path tracking control research were discussed. Above that, the research status of path tracking algorithms for articulated steering vehicles was elaborated, and the advantages and disadvantages of each algorithm as well as its scope of application were summarized in comparison, with further generalization about the methods of validation and evaluation of the algorithms. The research focuses and directions of articulated steering vehicle path tracking technology were proposed as follows: the research of vehicle modeling considering vehicle dynamics factors and dynamic time-varying characteristics of model parameters, the design of multi-condition adaptive control algorithms incorporating the adaptation of different algorithms and combining the intelligent algorithms, the development of standardized and process-oriented high-fidelity simulation scenarios, and the research of evaluation methods for integrating multiple performances included accuracy, stability, and security. This review can serve as a valuable reference for further research on the path tracking strategies of articulated steering vehicles.

Key words: unmanned driving; articulated steering vehicles; path tracking; control strategy; dynamic models; verification evaluation

收稿日期：2023－09－15　修回日期：2023－10－15
基金项目：国家自然科学基金面上项目(52075461)
作者简介：祝青园(1978—)，男，教授，博士生导师，主要从事无人驾驶和智能农机装备等研究，E-mail：zhuqy@xmu.edu.cn
通信作者：邵桂芳(1978—)，女，副教授，博士，主要从事控制技术与农机导航等研究，E-mail：gfshao@xmu.edu.cn

0 引言

铰接转向车辆(Articulated steering vehicles, ASV)是一种特殊结构的车辆,由前后车体两部分构成,并通过主动旋转的铰接关节连接。不同于普通车辆的转向方式,铰接转向车辆通过车体之间的相对转动实现转向,具有较小的转弯半径[1]。此外,与类似尺寸的车辆相比,它具有较大的牵引力和机动性,因此常用于农业[2-3]、林业[4-5]、采矿[6-7]和建筑[8]等领域。由于铰接转向车辆作业具有路径固定、重复性大、环境恶劣和劳动强度高的特点,催生了迫切的无人化需求,如农业铰接式拖拉机在复杂崎岖地形下的农作物转运[9-10],铰接式植保车的农田果园植保喷药[11-12],多用途铰接式机器人的农作物种植、收割与状态监测、农药喷洒[13],以及铰接式装载机的矿区矿石运输、建筑物料搬运[14],铰接式压路机的矿山路面压实[15]等,都需要通过无人驾驶技术来实现更为高效、安全的作业[16]。铰接转向车辆的无人驾驶,要求车辆能够根据预定作业任务,实现自主导航和控制,一般包括环境感知、运动规划和跟踪控制 3 个模块,如图 1 所示。

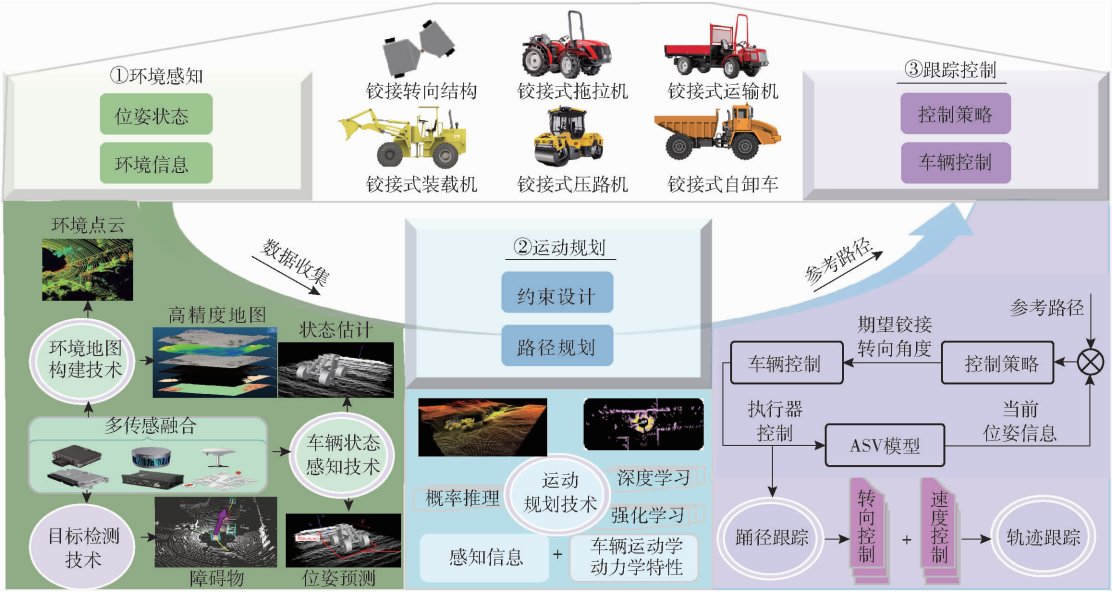


图 1 铰接转向车辆无人驾驶模块及关键技术构成框图

Fig. 1 Articulated steering vehicle unmanned driving modules and key technologies

近年来,随着基于多传感器融合的车辆状态感知技术及基于智能算法的运动规划技术逐步成熟,铰接式工程机械、铰接式移动机器人高精度定位、位姿估计、避障决策等应用也相继产生[17-21]。相对而言,由于特殊的转向结构、非结构地形的复杂激励等引起的控制稳定性及安全性问题,使得铰接转向车辆的跟踪控制技术仍面临着以下困难和挑战:整车结构复杂,控制响应难以准确表征;作业环境恶劣,控制过程受环境干扰难以忽略;工况复杂多变,单一控制算法难以保证跟踪准确性、安全性和稳定性。解决上述问题急需研究和改进现有跟踪控制技术,以推进先进跟踪控制技术在铰接转向车辆上的应用,进而推动铰接转向车辆无人驾驶技术的发展。

跟踪控制可以分为轨迹跟踪和路径跟踪两类任务。轨迹跟踪通过控制车辆的纵向速度和转向运动使车辆按照规划轨迹(时空信息)到达路径参考点[22-23]。路径跟踪只关注车辆的转向控制以使车辆沿着预定的路径行驶。相较于轨迹跟踪,路径跟踪简化了控制问题[24],应对不同环境和任务需求时灵活性更高,在铰接转向车辆的跟踪控制研究中更受关注。路径跟踪研究通常从车辆建模、控制算法设计、验证与评估 3 方面展开。其中,建模指建立车辆的数学模型来描述车辆的运动响应;控制算法设计指基于车辆模型结合感知、规划信息计算合适的控制输入;验证与评估指通过车辆虚拟运动仿真或试验验证比较分析控制算法的有效性和优越性。针对上述铰接转向车辆路径跟踪研究已有文献进行了部分综述:白国星等[25]概述了矿用铰接式车辆数学建模与路径跟踪研究,并通过算法比较指出了模型预测控制(Model predictive control, MPC)算法跟踪大幅度曲率突变路径时的优越性。但由于车辆结构特殊、作业工况多且复现困难等问题,还需进一步对铰接转向车辆路径跟踪算法的适用性、验证与评估方法分析总结。

综上,为更全面地了解铰接转向车辆路径跟踪相关工作的研究进展,本文梳理国内外从 20 世纪

90 年代至今有关铰接转向结构特征车辆的路径跟踪研究工作，从车辆模型、路径跟踪控制算法及其验证与评估方法 3 方面展开综述分析，内容框图如图 2 所示。

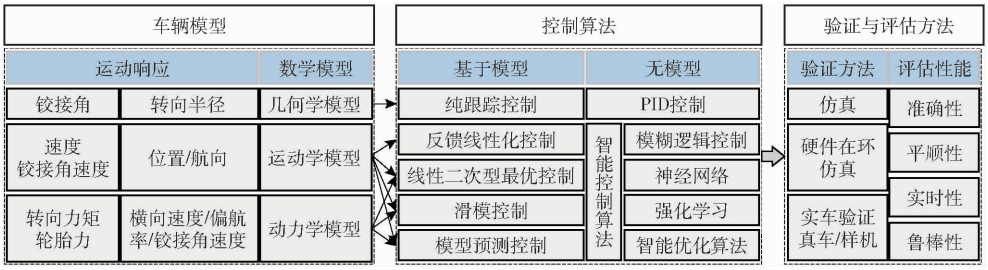


图 2　研究内容结构框图

Fig. 2　Structural diagram of research content

1　铰接转向车辆模型

铰接转向车辆模型是用于模拟和描述铰接转向车辆在转向角和速度等控制输入下响应行为的数学模型，根据构建方法可分为几何学、运动学及动力学模型。模型的准确性、稳定性和可靠性对于控制算法的开发有着重要的作用。一方面，车辆模型可用于控制算法的设计，计算跟踪参考路径所需的转向控制量。另一方面，车辆模型可作为被控对象，用于控制算法的验证和优化。在选择模型时，需要综合考虑其准确度和复杂性，以适应不同的应用需求。本部分通过对几种模型的对比，指出模型的适用场景和局限性，为车辆控制算法设计时的模型选择及优化提供参考。

1.1　几何学模型

几何学模型表示的是铰接转向车辆在运动时前后车体的转弯半径与铰接角的关系，主要用于基于几何学模型的路径跟踪算法开发。图 3 为铰接转向车辆的几何学模型示意图，通过转弯中心 O、前后车轮轴的中点 m、n 以及铰接点 h 组成的直角三角形，可以推导出前后车体转弯半径 r_1、r_2 与铰接角 γ 之间的数学关系，当前后轮轴中心到铰接点的距离 l_f、l_r 近似相等时，γ 为

$$\tan\gamma = \frac{l_f}{r} \tag{1}$$

式中，$r = r_1 = r_2$。该模型多用于车体纵向对称的小型铰接车，如用于农药喷洒[26]、棉田种植[13]等任务的铰接式农用车等，但由于建模时未考虑车辆的速度和加速度等影响，因此在不同速度和跟踪路径下该模型的准确性存在差异。

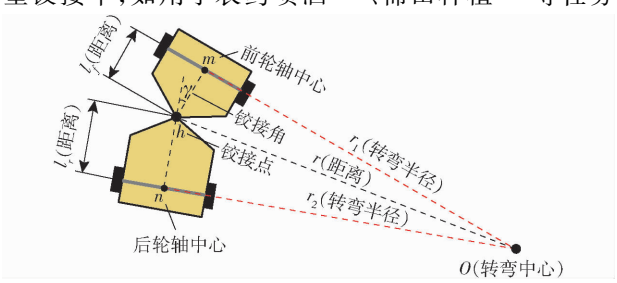


图 3　几何学模型示意图

Fig. 3　Schematic of geometric model

1.2　运动学模型

运动学模型一般描述的是铰接转向车辆在速度、铰接角速度输入下，车辆的位置、航向及铰接角的参数变化，可用于计算路径跟踪时控制输入及预测车辆在控制输入下的运动轨迹，是路径跟踪算法设计中的常用模型，如图 4 所示。在建模过程中，一般以前后车体的车轴中心为原点，基于坐标变换，推导前后车体的位置和姿态变化关系。根据是否考虑侧滑可将其分为经典运动学模型和考虑侧滑的运动学模型。

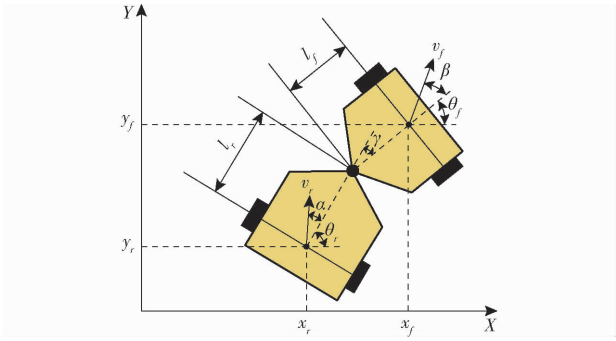


图 4　运动学模型示意图

Fig. 4　Schematic of kinematic model

1.2.1　经典运动学模型

早期的铰接转向车辆运动学模型参考前轮转向的车辆运动学模型建立，忽略了铰接角速度的影响，只能反映铰接角固定时的运动状态[27]，导致在变铰接角条件下无法准确描述车辆的运动轨迹。因此，研究者们提出了目前常用的经典运动学模型。该模型建立的假设前提一般为：垂直于车身轴的速度为零，不考虑车辆的侧滑，所有运动都在一个平面内。

基于以上假设，车辆的位移可以用车轴中心点在车辆纵向速度控制下，全局坐标系 X、Y 方向上位置变化表示。航向角速度可以根据前后车体与铰接角速度的运动关系，以及前后车体中心处的速度相

对于铰接点的速度具有相同变化推导得出。以基于前车体车轴中心的运动学方程为例,铰接转向车辆经典运动学模型的一般形式为[28]

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_f\\ \dot{y}_f\\ \dot{\theta}_f\\ \dot{\gamma}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta_f & 0\\ \sin\theta_f & 0\\ \dfrac{\sin\gamma}{l_f\cos\gamma+l_r} & \dfrac{l_r}{l_f\cos\gamma+l_r}\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_f\\ \dot{\gamma}\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中,(x_f,y_f)、θ_f、v_f 为前车体轮轴中心的位置、航向角及速度。

该模型在建立过程中忽略动力学效应(如轮胎特性、摩擦力、载荷力)带来的车辆侧滑等影响[29],因此适用于低速、路面状况良好条件下的跟踪控制,而在高速、路面条件不佳等动力学效应难以忽略的场景,其准确性则无法满足。

1.2.2 考虑侧滑的运动学模型

由于铰接转向车辆在高速自主作业、泥泞湿滑的水田等场景下行驶时,容易发生侧滑,因此,研究者在建模时考虑了侧滑角的影响[30-33]。侧滑角定义为车辆真实速度同垂直于轴方向之间的角度。该运动关系可以表示为

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_f\\ \dot{y}_f\\ \dot{\theta}_f\\ \dot{\gamma}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos(\theta_f+\beta) & 0\\ \sin(\theta_f+\beta) & 0\\ \dfrac{\sin(\gamma+\beta-\alpha)}{l_f\cos(\gamma-\alpha)+l_r\cos\alpha} & \dfrac{l_r\cos\alpha}{l_f\cos(\gamma-\alpha)+l_r\cos\alpha}\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_f\\ \dot{\gamma}\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中 β、α——前、后车体侧滑角

如果侧滑角先验已知,则考虑侧滑角的运动学公式相对来说更加精确。而受车辆的速度、质量、轮胎-地面相互作用和铰接角变化等因素的影响,侧滑角是高度非线性变化的[34]。因此确定侧滑角的大小是建立该模型的主要难点之一。有研究者提出了基于卡尔曼滤波及其改进算法、神经网络的侧滑角实时估计算法[35-40],可提高此模型的准确性。

1.3 动力学模型

动力学模型描述了铰接转向车辆在前后车体的横向力、纵向力以及转向力矩等作用下车辆速度、铰接角速度等状态的变化,是研究铰接式车辆操纵特性和稳定特性的基础。不同于 1.2 节的运动学模型,它考虑了铰接转向车辆的车辆内力、轮胎力以及车身质量等因素,因此适用的操纵条件和行驶工况更为广泛。在建模过程中,铰接转向车辆的动力学模型通常被分为车身动力学模型、轮胎模型及转向系统模型。由于多数研究在建模时将转向系统模型等效为一个转向力矩[41-43]或者弹簧阻尼系统[44-45],以简化建模过程,因此下面重点阐述铰接转向车辆的车身动力学模型和轮胎模型。

1.3.1 车身动力学模型

铰接转向车辆车身动力学模型的输入是轮胎力、转向力矩及车辆各项特征参数,输出为车辆的运动参数。该模型构建的理论依据主要有牛顿第二定律、欧拉方程及达朗贝尔原理,分别用于建立力平衡方程、力矩平衡方程以及进行加速度与惯性力的转换[46]。铰接转向车辆整车是一个多自由度的非线性系统:前、后车体分别具有 3 个方向的平移和旋转运动自由度,而铰接结构限制了前后车体之间的 3 个平移及 2 个旋转自由度,即前后车体有 7 个自由度需要考虑,一些特殊的摆动桥或悬架结构还会带来额外的自由度。可以根据自由度(Degree of freedom, DOF)划分车身动力学模型,用于描述车辆在纵向、横向、垂向、侧倾、俯仰及横摆方向的运动,如表 1 所示。

表 1 铰接转向车辆车身模型概述

Tab.1 Overview of articulated steering vehicle body models

动力学模型	描述	适用场景
2-DOF[47-49]	整车横向和横摆运动	匀速、固定铰接角
3-DOF[50-56]	前或后车体的横向、纵向和横摆运动/前后车体的横摆及横向运动	匀速、平稳转向控制
4-DOF[46,57-58]	前车体的横向、纵向、横摆及后车体或铰接点处的横摆运动	低速/高速、变铰接角输入场景
6-DOF[47,59]	整车的纵向、横向、垂向、俯仰、侧倾、横摆运动	额定速度、最大转角下的转向
7-DOF[60]	铰接点处纵向、横向、垂向、侧倾、俯仰、横摆及后车体侧倾运动	斜坡、越障场景
8-DOF[61-62]	前车体纵向、侧向、垂向、侧倾、俯仰、横摆以及后车体相对前车体的侧倾、横摆运动	路面平整、干燥/湿滑 低速/高速场景

在低自由度动力学模型中,2-DOF 动力学模型表示铰接转向车辆固定铰接角时的稳态转向行为,对其系统矩阵的特征值分析可以为研究更高自由度的复杂模型提供数据上的参考对照[63]。由于较为简单,该模型也可作为整车稳定性控制的参考模型[47-49]。3-DOF 动力学模型常用于研究车辆的转向驱动力和阻力特性[54],以及分析各种因素对车辆横向稳定性的影响,如负载、质心位置、轮胎特性参数、转向系统刚度、质量及转动惯量等[50-55],可为铰接转向车辆跟踪控制策略的设计

提供依据。

上述 2 - DOF 和 3 - DOF 动力学模型在表征车辆的运动状态上仍存在局限，有研究者提出了铰接转向车辆的 4 - DOF 动力学模型[64]。该模型能够较为完整地表征前后车体的速度、航向与铰接角速度等状态信息，多被用于基于模型的路径跟踪控制算法设计[46,57]。但为了降低控制过程的计算复杂度，通常会基于小角度假设对模型进行简化，由此带来的问题是模型仅在小铰接角输入下准确性较高[56]。

总的来说，上述模型主要基于铰接转向车辆在二维平面上的运动推导。然而，当铰接转向车辆行驶在不平整的丘陵山地、农田坡道等道路时，车辆的侧倾、俯仰等运动更为明显[42,65]，对模型的准确性和稳定性影响较大。基于这个问题，有研究者提出了更为复杂的 6 - DOF、7 - DOF 和 8 - DOF 模型，分别研究了铰接转向车辆在额定速度和最大转向等极限行驶条件下的转向特性、稳定性及行驶平顺性等[47,59-62]。综合来看，这些模型对车辆运动的表征更为准确，但计算复杂度大，在控制算法的设计中难以保证实时性，因此多被作为控制算法验证时的被控对象，用于车辆行为的动态模拟[66]。

此外，也有研究基于拉格朗日法构建铰接转向车辆的动力学模型[47,67-73]。该方法主要分析车辆的动能和势能受外部作用力的变化，通过建立拉格朗日方程、推导作用在车轮的广义力，得到动力学方程

$$[\ddot{q}] = -\boldsymbol{M}^{-1}(q,\dot{q}) + \boldsymbol{M}^{-1}F_g \tag{4}$$

式中　$\boldsymbol{M}$——惯性矩阵

F_g——作用在轮胎上广义力

q——状态量

相较于上述基于牛顿力学的建模，该方法不需要分析车辆系统内力与力矩等因素，建模过程更为简单，但由于其包含复杂的微分和非线性动力学方程，导致求解过程较为困难[70]。

1.3.2　轮胎模型

轮胎力是车辆除重力外所受的主要外力，其模型精度对动力学模型的准确性有决定性作用[74]。轮胎模型用于描述车辆与地面间的相互作用，该模型的输入通常为滑移角、轮胎转速、路面附着系数及车辆垂向载荷等，输出为轮胎横向力、纵向力和回正力矩[75]。目前铰接转向车辆动力学模型中应用的轮胎模型主要有线性化轮胎模型[69]以及非线性的魔术公式(Magic formula，MF)[46,57,62,70]、Dugoff 轮胎模型[56]、Fiala 轮胎模型[51,69,75]，具体如表 2 所示。

表 2　轮胎模型概述

Tab. 2　Overview of tire models

轮胎模型	特点
线性化轮胎模型	常用于基于模型的控制算法设计，适用于侧偏角或横向加速度较小等场景
MF	基于试验数据拟合三角函数得到的统一组合公式，多用于整车运动模拟及状态观测，但测试成本和难度较高
Dugoff 轮胎模型	相较于 MF，计算简便，所需参数少，但准确性低于 MF
Fiala 轮胎模型	计算效率高，常用基于模型的控制算法设计、铰接转向车辆仿真系统设计

对于铰接转向车辆的控制算法设计来说，线性化的轮胎模型大大降低了控制过程的复杂性，但该模型仅适用于在平整农田、平坦矿区等路面附着力良好场景下的平稳行驶工况。当路面湿滑或存在斜坡时，轮胎滑移增大，线性化轮胎模型容易失效。此时可利用适用范围更广、精度更高的非线性轮胎模型，但该模型会增加动力学模型的复杂程度，需要进一步对其进行简化。例如有研究对 MF 轮胎模型进行了线性简化，在跟踪效果良好的同时减少了控制算法的求解时间[76]。

1.4　总结分析

通过上述分析可以发现，车辆模型对于描述车辆的运动响应十分重要。简单的几何学、运动学车辆模型适用于路面较为平整、简单低速的作业场景；而低自由度的线性化动力学模型主要用于铰接转向车辆的稳定性研究和转向特性研究；高自由度的动力学模型可以进一步描述铰接转向车辆在包含俯仰、侧倾等行驶条件下的各种动力学特性，为控制算法的设计提供更详尽的车辆状态传递关系，但运算量较大。此外，一些研究为了降低控制过程的计算复杂度，对模型进行了相应的线性化假设，然而该类假设一般仅适用于小角度转向等轮胎滑移较小的场景。因此在应用时，需要基于实际控制需求，挑选合适的模型进行跟踪控制算法构建。

2　路径跟踪控制算法

控制算法是铰接转向车辆实现路径跟踪的核心，通过获取车辆的位置、姿态等状态信息，基于不同的控制算法计算转向输入进而控制车辆沿着预定的路径行驶。根据计算过程中是否结合车辆数学模型，可将控制算法分为基于模型的控制和无模型控制。本节着重讨论基于模型的控制：纯跟踪控制(Pure pursuit control，PPC)、反馈线性化控制(Feedback linearization control，FLC)、滑模控制(Sliding mode control，SMC)、线性二次型最优控制

(Linear quadratic regulator, LQR)、模型预测控制(MPC)、经典无模型控制——PID (Proportion integral differential)控制以及近年兴起的无模型智能控制算法,主要研究进展如图 5 所示。

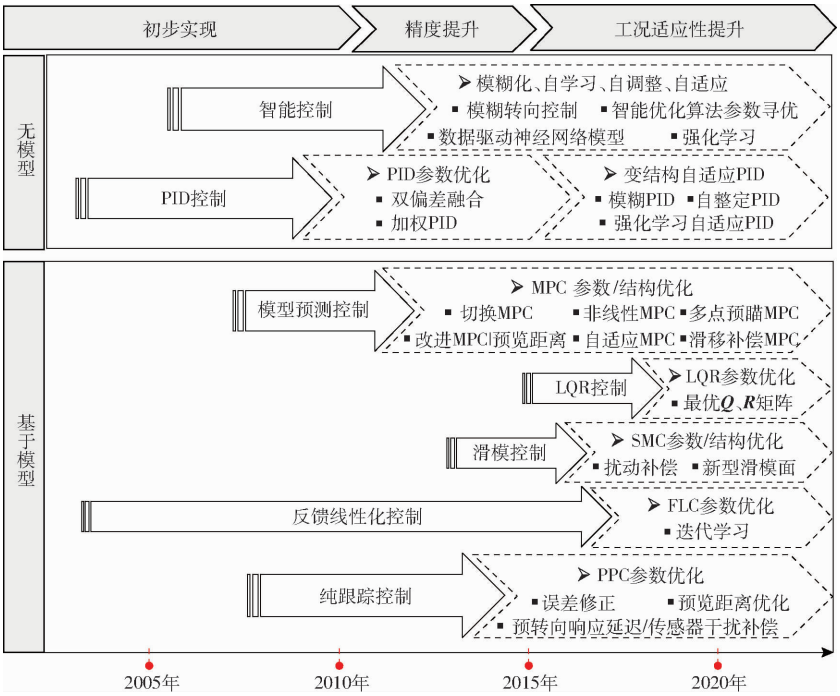


图 5 铰接转向车辆控制算法研究进展

Fig. 5 Research progress on articulated steering vehicles control algorithm

2.1 基于模型的控制算法

2.1.1 纯跟踪控制

纯跟踪控制(PPC)是一种基于几何学模型的反馈控制算法,于 20 世纪 90 年代由卡内基梅隆大学学者提出[77],基本原理是根据车辆中心与参考路径上目标点之间的几何关系计算车辆的控制转角。铰接转向车辆纯跟踪控制的几何学模型如图 6 所示,该控制一般先通过车辆当前位置和预瞄距离 L 确定目标点 (x_r,y_r),进一步确定车辆沿圆弧到达目标点所需的转弯半径 r,最后基于上述几何学模型计算得到铰接角 γ 控制律[13]

$$\gamma = 2\arctan\frac{2l_f\sin\theta}{L} \tag{5}$$

式中 θ——车辆同目标点夹角

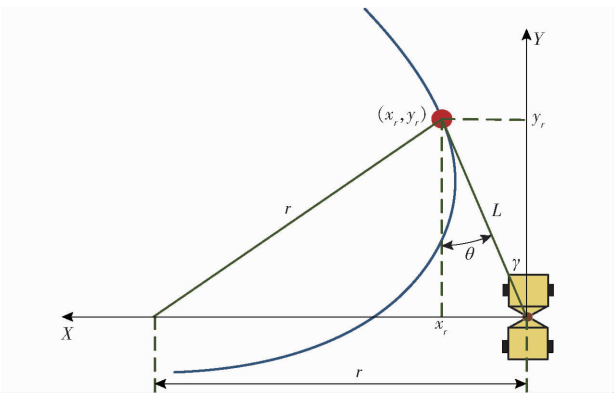


图 6 纯跟踪算法的几何模型

Fig. 6 Geometry of purepursuit algorithm

从式(5)可以看出,纯跟踪控制的核心设计参数为预瞄距离。针对棉田播种时的直线与地头转弯作业场景,RAINS 等[78]设计了面向铰接式农用车的纯跟踪算法,实现了对直线路径良好的跟踪效果,但由于预瞄距离固定,该控制在路径曲率突变、转弯半径较大时,跟踪误差显著增大。FUE 等[13]通过考虑铰接式农用车转弯延迟及引入误差修正参数,YAO 等[79]以反馈控制补偿铰接式压路机航向响应的滞后和传感器的干扰,上述研究改进了纯跟踪算法,进一步提高了受转向响应延迟、传感器噪声影响时纯跟踪算法的跟踪精度。

纯跟踪控制实现过程简单且设计参数少,易于调试,但其跟踪精度和稳定性易受影响,如较短的预瞄距离和过快的控制频率,都容易引起车辆行驶路径振荡、跟踪误差难以收敛等问题[13]。此外,该算法主要基于车辆的几何特性设计,未考虑车辆在速度和转向较大时的动态响应特性。因此,纯跟踪控制多用于简单直线道路、速度变化平缓的作业场景。未来的设计中,可以通过调节预瞄距离及引入多个预瞄目标点以提高其在大曲率转向、变速等作业场景下的跟踪精度。

2.1.2 反馈线性化控制

反馈线性化控制(FLC)是一种非线性控制设计方法,被广泛应用在铰接转向车辆的路径跟踪研究中[80-83]。这类研究一般基于铰接转向车辆误差运

动学状态空间方程，通过引入状态反馈，将非线性系统线性化，并利用线性控制理论对闭环系统进行控制律设计，以满足要求的动态和稳态响应性能。铰接转向车辆反馈线性化控制通常基于极点配置法，考虑系统的响应时间、稳定时间、超调量及闭环稳定性，对上述闭环线性系统的极点进行分配，求解得到反馈增益[84]。DEKKER 等[85]在反馈线性化控制基础上，引入迭代学习算法，根据前一次跟踪相同路径的误差及控制量调整控制算法参数，实现在跟踪过程中误差的自修正，提高了无人地下装载机循环作业的跟踪精度及鲁棒性，该方法适合于在循环的行驶工况中开展跟踪任务的铰接转向车辆。

反馈线性化控制在铰接转向车辆稳定行驶工况下的精度和稳定性可以满足控制要求，而当车速、参考路径曲率变化时，该控制的响应性能将受到很大影响，因此需要根据这些变化自适应地调整反馈增益，以保持控制结果的稳定性[29]。相对于其它控制方法，反馈线性化控制可以设计跟踪过程的响应特性，利用对状态变量的直接观测实现更精确的控制，且能避免控制输入饱和问题[83]，多用于需要较高精度和稳定性的跟踪场景。但该方法对铰接转向车辆模型准确性要求较高，因此在处理车辆的非线性运动和路面扰动等问题上存在局限性。

2.1.3　滑模控制

滑模控制（SMC）是一种变结构的非线性状态反馈控制算法，“滑模”指的是系统沿控制结构的边界（称为滑动面）滑动，控制律利用快速切换策略迫使系统状态到达滑动面后朝平衡点运动。该控制方法的基本思想是基于铰接转向车辆的误差状态方程，设计切换函数和趋近律 $\dot{s}$，反向求解得到控制律，根据车辆的误差状态变化改变控制响应，迫使车辆误差状态按照给定滑动面 $s=0$ 朝平衡点运动[86]。切换函数和控制律为

$$s = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x} = c_1 e_d + c_2 e_h + c_3 e_c \tag{6}$$

$$\boldsymbol{u} = (\boldsymbol{C}\boldsymbol{B})^{-1}(-\boldsymbol{C}\boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \dot{s}) \tag{7}$$

其中　$\boldsymbol{C} = [c_1 \quad c_2 \quad c_3]$

式中　s——切换函数　　e_d——位移误差

e_h——航向误差　　e_c——曲率误差

$\boldsymbol{C}$——控制参数矩阵

$\boldsymbol{x}$——误差状态矩阵

$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$——状态偏差方程的系数矩阵

$\boldsymbol{u}$——输出矩阵

赵翾等[87]面向行驶于农田野外等崎岖地形的铰接式农用车，开展了滑模变结构控制算法设计，该研究利用 Ackermann 公式得到 SMC 函数，并采用基于连续函数的指数趋近律，使系统有较快的响应和较小的抖振，在一定误差范围内实现了车辆对参考路径的有效跟踪。为了提升 SMC 的跟踪精度，YANG 等[49]在标准的滑模控制算法中额外考虑外界扰动和模型不确定性，并用此补偿了参考轨迹的曲率的扰动效应。此外 NAYL 等[88]以铰接转向车辆非线性误差运动学模型为基础，设计了一种新型的非线性连续滑动面，与传统的滑动面相比，该滑动面分布在所有的相平面中，使控制信号是连续的函数，有效地降低了跟踪控制过程中的抖振问题，实现了更快地收敛。

相较于反馈线性化控制，SMC 对系统参数、车辆建模误差和外部干扰的变化不敏感，具有良好的瞬态性能和快速响应能力[89]。因此，在铰接转向车辆的路径跟踪控制中，SMC 对车辆模型精度要求低且具有较好的鲁棒性，多用于处理路面条件、道路曲率变化等复杂环境下的跟踪控制问题，但由于过渡时间短，在跟踪曲率大幅度变化的路径时容易引起系统振荡。

2.1.4　线性二次型最优控制

线性二次型最优控制（LQR）的核心思想是以最低的成本实现最佳的控制效果[90]。与上述反馈线性化控制类似，在铰接转向车辆的路径跟踪研究中，LQR 控制一般基于铰接转向车辆线性化的误差状态模型，并建立反馈控制律 $u=-Kx$ 进行控制。不同的是，LQR 以误差状态和控制量的二次型函数加权和的积分为目标函数

$$J(\dot{\gamma}) = J_0(t) + J_1(t) = \int_0^{\infty} (\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{X} + \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{U})\,\mathrm{d}t \tag{8}$$

式中　$J_0(t)$——跟踪误差的时域积分

$J_1(t)$——控制量的时域积分

$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$——权重矩阵

$\boldsymbol{X}$——跟踪误差矩阵

$\boldsymbol{U}$——控制量矩阵

在设计过程中需要根据不同的控制和优化目标，合理配置 $\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$ 矩阵。

在整个时域内优化求解使得目标函数取得最小值的状态反馈矩阵 $\boldsymbol{K}$[91]。$\boldsymbol{K}$ 计算式为

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} \tag{9}$$

式中　$\boldsymbol{P}$——Riccati 方程的对称半正定矩阵

在基于 LQR 的铰接转向车辆路径跟踪研究中，控制算法的控制效果取决于 $\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$ 矩阵参数的选择，在早期的研究中主要依靠主观经验结合大量的测试分析来配置 $\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$ 矩阵，耗费大量的时间和精力[92]。因此，研究者利用遗传算法（Genetic algorithm，GA）、蚁群算法（Ant colony algorithm，ACA）及粒子群算法

(Particle swarm optimization, PSO)等智能聚类算法寻找最佳的 $\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$ 矩阵参数,以提高 LQR 设计效率和控制的最佳性能[56,91,93-94]。此外,上述 LQR 控制方法是基于铰接转向车辆的运动学模型设计的。田均春等[48]基于铰接转向车辆的二自由度动力学模型,根据前车体的质心侧偏角偏差和横摆角速度偏差,设计了基于 LQR 的差动协调控制,相较于基于运动学的方法,该方法在提升车辆跟踪精度的同时,也提高了铰接转向车辆在路径跟踪时的姿态稳定性。

由于 LQR 控制根据误差反馈信息进行控制,当参考路径曲率发生突变时,控制算法难以及时反应,最终导致其跟踪性能不佳。针对这个问题,一些研究通过将预测位姿与参考位姿的偏差作为前馈信息输入至 LQR 控制算法,提高了铰接转向车辆控制时的反应速度[95]。虽然 LQR 控制通过引入前馈信息提高了其在曲率突变场景中的跟踪性能,但其跟踪性能依赖于前馈信息的准确性,在路径曲率复杂变化的场景下,该控制算法的跟踪性能将难以保证。LQR 控制在响应性能上优于上述的反馈线性化控制,与 SMC 相比控制过程更平滑,适用于关注跟踪过程的快速响应、稳定性及准确性的场景,但该控制对铰接转向车辆模型准确度和可靠性要求较高。

2.1.5 模型预测控制

模型预测控制(MPC)也是基于最优化思想的控制方法,但不同于 LQR 只在当前时刻内进行优化求解,MPC 根据车辆模型计算未来时刻的车辆状态,结合当前状态与未来状态进行求解,其研究对象可以是线性模型,也可以是非线性模型。此外,MPC 具有处理执行器约束、安全性、稳定性等多约束条件的能力[96]。MPC 已广泛应用于铰接转向车辆的路径跟踪控制中[43,48,64,96-98]。这些研究一般是基于铰接转向车辆的线性化运动学数学模型,结合车辆当前位姿状态信息,计算预测时域内的车辆位姿状态,通过目标函数

$$J(\widetilde{X}(t),\Delta U(t)) = \sum_{i=1}^{N_p} \| \widetilde{X}(t+i|t) - \widetilde{X}_{ref}(t+i|t) \|_{\boldsymbol{Q}}^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \| \Delta U(t+i|t) \|_{\boldsymbol{R}}^2 + \rho\varepsilon^2 \tag{10}$$

式中 N_p——预测时域 N_c——控制时域

ρ——权重系数 ε——松弛因子

$\widetilde{X}(t+i|t)$——输出路径预测值

$\widetilde{X}_{ref}(t+i|t)$——输出的参考路径

$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$——各变量的权重矩阵

在一定的动力学约束下寻找最优解,从而获得当前时刻的最优控制输入,并不断滚动优化实现对期望路径的跟踪,如图 7 所示。

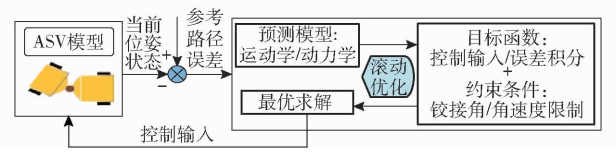


图 7 MPC 原理图

Fig. 7 Schematic of MPC

为了提高 MPC 在不同行驶条件和工况下的跟踪性能,学者们在传统 MPC 算法的基础上设计了切换 MPC、引入预瞄距离的 MPC、自适应 MCP 等改进的 MPC 算法。文献[31-32,99]设计了切换 MPC,以处理不同的速度和滑移角下的控制问题,这些研究基于成本函数选择决策控制算法,通过仿真实验验证了提出算法的跟踪精度高于 LQR 和反馈线性化控制。孟宇等[100]根据车速计算了预瞄距离,减少 MPC 控制算法在跟踪曲率突变路径中的超调量。李斯旭等[101]提出了一种基于改进动力学模型的 MPC,通过补偿动力学模型的线性化误差,并考虑路径多点预瞄误差的控制目标,有效提升了 MPC 在高速、曲率连续变化等工况下的跟踪精度及平顺性。SHI 等[102]基于自主轮式装载机的运动学和动力学跟踪误差模型,构建了一种考虑路径曲率扰动的自适应模型预测控制(Adaptive model predictive control, AMPC),改善了在不同曲率变化路径中的跟踪效果。BAI 等[103]提出了一种非线性模型预测控制(Nonlinear model predictive control, NMPC),以铰接车非线性运动学模型作为预测模型,解决了传统线性化 MPC 在车辆纵向速度超过 2 m/s 后性能不佳的问题,仿真结果表明 NMPC 在纵向速度 4 m/s 下也具备良好的跟踪性能。ZHOU 等[104]利用遗传算法在系统采样频率内实时获得最优预测和控制时域参数,解决了传统 MPC 时域参数固定,难以适应于铰接式拖拉机在果园工作时面临不同速度和路况的问题,显著提高了跟踪路径的准确性、稳定性和平滑性。

上述研究优化了 MPC 在特定场景下的跟踪性能,但这些设计中仅将侧滑角作为固定设计参数或忽略了侧滑角影响,未考虑不同速度下侧滑角的动态特性,导致实际跟踪过程的稳定性和准确性不足。针对这个问题,SHAHIRPOUR 等[43]基于简化的动力学模型,利用当前侧滑角计算了信号传输延迟后及预测范围内的侧滑角,并将其设置在 MPC 矩阵中,通过与常规 MPC 对比,验证了该方法在变速工况下的优越性。

MPC 算法具有广阔的发展前景，通过引入未来时刻的车辆状态，MPC 可以结合参考路径的变化趋势来求解最优解，这使得它在跟踪复杂路径的能力和精确性上都优于其他控制方法，且能够适应存在不确定性和动态干扰的复杂环境。因此，MPC 可用于参考路径复杂、需要考虑控制过程中车辆非线性运动、转向及避障安全性约束等场景[43,64,105-106]。但该方法的准确性依赖于车辆模型的保真度，而精确的模型通常具有更高的阶数，在实时优化求解时，对系统处理器和内存的要求更高。对此，SHEN 等[107]通过连续/广义最小残差算法（Continuation/generalized minimal residual，C/GMRES）提高了 MPC 的求解效率。考虑到 NMPC 使用非线性模型增加了控制算法求解的复杂性，导致其实时性不足，白国星等[108]通过减少控制步数和降低控制频率减小计算需求，以优化 NMPC 的实时性。SONG 等[109]通过将非线性动力学模型嵌入到线性参数变化（Linear parameter varying，LPV）模型中，设计了一种 LPV-MPC 模型，大幅度提升了计算效率。但上述方法可能会降低 MPC 整体跟踪性能的准确性和可靠性。因此，针对该算法的求解优化问题及合理的简化问题将是重要的改进方向。

2.2　经典无模型控制

PID 控制是经典的无模型控制方法，该控制不依赖于铰接转向车辆的数学模型，控制效果取决于比例、积分、微分系数的选择[110]，其原理简单，易于实现。在路径跟踪中，PID 控制通常基于车辆当前位姿状态与参考路径的误差，对其进行比例、积分、微分运算获得控制信号，如图 8 所示。

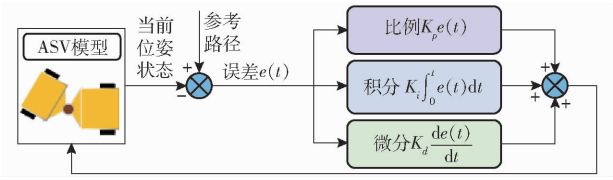


图 8　PID 控制框图

Fig. 8　Schematic of PID control

针对铰接转向车辆路径跟踪的研究，传统 PID 控制常被用作其他控制方法的对比方法，以评估控制算法性能[70,111]。有研究在传统 PID 控制的基础上对反馈误差进行优化，以提高 PID 控制的跟踪性能。李建国等[112]提出了一种考虑融合横向位置误差和航向误差的双偏差融合 PID，用于跟踪地下巷道的中心线，该控制相较于传统考虑单误差的 PID 控制，提高了铰接转向车辆跟踪控制的快速性、稳定性以及对车速变化的适应性。DOU 等[57]提出了一种加权 PID 控制方法，通过归一化位移误差和航向角误差来计算铰接转向车辆的转向扭矩。

此外，也有部分学者通过结合其他算法来提高 PID 控制的性能。邵俊恺等[113]基于强化学习算法对 PID 参数进行在线自适应整定，并验证了该方法可以有效降低控制过程中的超调和振荡问题，较传统 PID 实现了更为精确的跟踪效果。TAN 等[114]设计了一种模糊 PID 控制，降低了铰接转向车辆在地下巷道环境跟踪时的振荡效应。在最新的研究中，GUAN 等[115]利用智能优化算法设计了一种超参数可动态整定的 PID 控制算法，在真实的不平整路面条件下实现了铰接式压路机对直线、圆弧路径的厘米级精确跟踪。虽然已有学者基于改进 PID 控制方法实现铰接转向车辆的路径跟踪，且通过引入其他优化算法实现了 PID 参数的快速寻优及自适应，但由于路径跟踪控制通常受车速、路面、路径曲率等多因素影响，造成 PID 算法在处理复杂路径跟踪时易出现超调量大、响应慢等问题，因此多用于在行驶工况稳定、环境干扰低的场景中简单路径的跟踪。

2.3　智能控制算法

具有变结构、变质心特点的铰接转向车辆是一个典型的高阶非线性系统，针对非线性问题的建模与求解，虽然传统的控制方法中有对应的优化方法，这些方法也具有严谨的理论支撑，但其计算复杂且控制对象具有局限性[116]。例如，传统控制算法往往需要基于固定的铰接转向车辆模型以及控制算法参数，这限制了其在环境变化、面对干扰和不确定性时的性能。近年来，得益于人工智能、信息技术的发展，基于人工智能、机器学习、运筹学等理论的智能控制算法引起了学者们的关注，它具有自适应、自组织、自学习、容错性、推理能力，为解决高度非线性系统控制问题提供了一种新思路[117]，为路径跟踪的精确性[118]、鲁棒性[119]和自适应性[120]等性能的进一步优化提供了可能。常用的智能算法包括模糊逻辑控制、机器学习算法中的神经网络控制、强化学习及各种智能优化算法，如粒子群优化、遗传算法及蚁群算法等。

2.3.1　模糊逻辑控制

模糊逻辑控制是利用模糊数学的基本思想和理论实现对系统的精确控制，该控制不依赖于精确的数学模型，而是通过隶属度函数对控制的输入输出量进行模糊化，并根据建立的模糊集合与模糊规则推理得到车辆的控制输出，控制方法原理如图 9 所示，相对于传统控制方法大大简化了算法的复杂性[121]。文献[70,111]分别面向铰接式轮式装载机和自卸车开发了基于模糊控制的控制算法，输入是位移、航向和曲率误差，输出是转向速度和车速占空

比,并与 PID 控制进行对比,结果表明模糊控制能够使车辆更快速地向参考路径收敛,且当改变跟踪路径时,不需要调整控制算法的参数。但该方法完全凭经验建立模糊规则,鲁棒性较差。针对该问题,NORRIS 等[122]开发了用于优化模糊转向控制性能的实时驾驶员操作模型,同时设计了用于减少模糊控制规则总数的分层规则库,为进一步实现自适应模糊控制算法提供了良好的解决方案。但由于模糊控制建立的规则不具有连续性,因此在路径跟踪时平顺性较低。

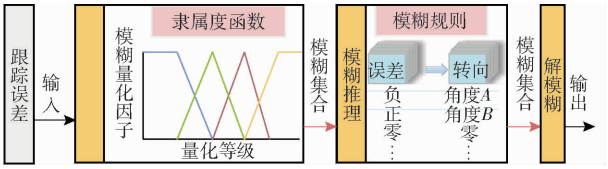


图 9 模糊逻辑控制原理图

Fig. 9 Schematic of fuzzy logic control

2.3.2 神经网络控制

神经网络由许多简单的神经元组成,具有高容错性、泛化性等特点。在铰接转向车辆的路径跟踪研究中,神经网络一般被用于构建转向控制模型,其主要原理是基于对大量驾驶行为数据的训练,搭建表示道路、车辆状态、传感数据等与转向角之间关系的神经网络模型,如图 10 所示。该模型能够学习并提取铰接转向车辆转向的特征,对不同环境的不确定及干扰有适应性,且由于神经网络输出可连续,因此跟踪过程的平顺性较高。DOU 等[123]面向地下隧道环境行驶的铰接式无轨车辆开发了一种基于神经网络的相对导航控制律,并基于采集的车辆铰接角、转向时间等信息,构建了车辆的转向运动学模型用于转向控制,并验证了该算法可用于不同隧道环境中的车辆导航控制。张文明等[124]建立了铰接式自卸车的神经网络驾驶员模型,其输入包含道路信息、车辆侧向加速度、侧向速度和侧向位移等,输出为铰接角,该模型提高了车辆在弯道、变曲率巷道行驶时的平稳性及控制精度。虽然神经网络模型具有良好的适应性和学习能力,但其性能依赖于训练数据质量,且模型不具备可解释性。

2.3.3 强化学习控制

相比于上述神经网络基于大量数据来构建控制模型,强化学习算法不依赖于大量数据样本,而是通过智能体与环境的交互获取数据。该算法的基本原理是根据控制目标设计奖励函数,通过智能体与环境间不断地试错学习确定最佳的控制策略,使控制对象的动作能够从环境中获得最大累计奖励值(图 11)。近年来,在铰接转向车辆的路径跟踪中,强化学习控制展现了其在复杂、未知的作业环境强大

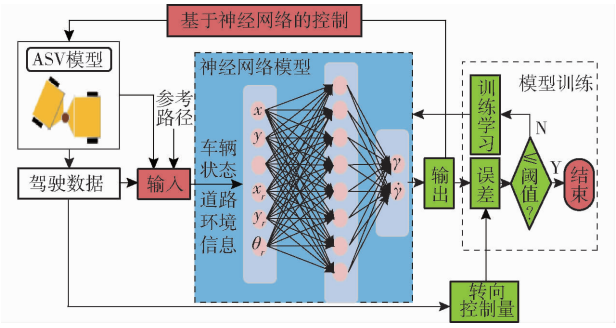


图 10 基于神经网络控制原理图

Fig. 10 Schematic of control based on neural network

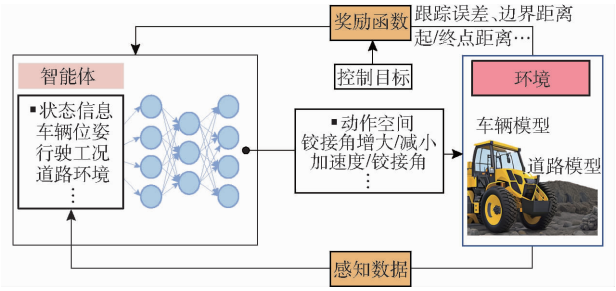


图 11 基于强化学习的控制原理图

Fig. 11 Schematic of control based on reinforcement learning

鲁棒性和自适应能力。针对重型铰接车辆在林业作业任务中面临地形崎岖,道路坡度、岩石等障碍物不均匀且未知等挑战,WIBERG 等[125]以带有六悬架结构的重型林业铰接车辆为控制对象,在虚拟环境中探索了强化学习控制车辆通过崎岖地形的可行性,该控制考虑了地形中的陡坡、障碍物、深沟以及车辆负载、滑移变化等因素,结合车辆当前速度、侧倾角、俯仰角、铰接角及悬架位移等信息,控制铰接角、悬架位移及车辆速度,使得铰接转向车辆以最小的滑移和能量消耗安全平稳地到达目标位置。

针对强化学习计算效率不高的问题,研究者通过优化奖惩函数设计、结合传统控制优化智能体训练框架等方式提高了强化学习的控制效率。石钧仁[126]设置以车辆到达轨迹点为主线事件、以跟踪误差大小为辅助事件的奖励函数,该控制基于确定性策略梯度算法,以道路曲率、车辆跟踪误差等为输入,车辆加速度和铰接转向角为输出,构建了跟踪铰接式装载机 V 型作业轨迹的控制策略,通过仿真验证了该策略对不同的 V 型作业任务具有自适应能力,但由于制定的奖励函数不完善,跟踪过程的平顺性不足。ZHAO 等[119]结合传统相对导航与深度 Q 网络作为训练框架,以车身与地下隧道左右侧距离、车辆与起点和终点距离以及车辆的速度、转向角状态信息为输入,以增大或减小铰接角为输出,在虚拟隧道场景下验证了该算法能够更为高效地开展训练。综合来看,上述研究展示了强化学习控制处理复杂、未知作业环境下控制任务的巨大潜力,通过设

计不同的状态输入及奖惩函数可用于不同场景和任务需求的铰接车路径跟踪中，但该算法的计算时间长，对计算资源的要求高，因此需要进一步优化强化学习算法以实现更为高效率的训练学习过程。

2.3.4　基于智能算法的控制算法优化

上述的几类智能控制方法都是基于智能算法直接设计控制算法，除此之外，也有学者利用智能算法优化传统控制算法，将经典控制理论与智能算法结合，使控制算法实现自适应地变参数、变结构调整[127]。

针对传统控制算法的设计参数多依赖于设计人员的经验，且通常固定不变，导致控制算法的工况适应性不足的问题。研究人员基于模糊控制[114]、强化学习[113]、智能优化算法[115]等实现了 PID 控制算法的控制参数自调整，改善了铰接转向车辆对复杂工况的适应性。文献[56，91，93 - 95，115]利用 GA、ACA 及 PSO 寻找 LQR 控制中的最佳 $\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$ 矩阵，使控制算法在铰接转向车辆的路径跟踪中达到最优的性能，通过对比发现，GA 运算和收敛速度快，PSO 优化效果更好，ACA 可以收敛到多个极值点，优化空间大。考虑到最优预瞄距离的选择受路径曲率、车速、系统响应速度等多因素影响，XIE 等[128]在云平台上基于 GA 实时获得最佳预瞄距离，并将其传输至车辆的实时跟踪控制算法中，提升了铰接式自驱动压路机在变路径曲率和多种行驶条件下的跟踪性能。

针对传统控制算法的控制精度不足问题，DEKKER 等[85]将迭代学习引入铰接转向车辆的反馈线性化控制中，提升了控制算法在相同路径下的跟踪精度。此外，考虑到传统 MPC 的计算复杂度高且设计参数固定，在复杂环境下的控制精度和响应速度不佳，有研究提出了基于机器学习的 MPC，通过搭建数据驱动模型，学习和优化 MPC 的预测模型及不确定干扰下的控制算法输出，从而提高 MPC 在复杂工况下的适应性及跟踪性能[129 - 130]。

综上，基于智能控制算法的路径跟踪研究是近些年铰接转向车辆路径跟踪的重要研究方向。相较于传统控制方法，这类控制方法有效提升了铰接转向车辆路径跟踪控制的精确性、实时性以及在多种工况下的适应性。对于直接基于智能算法的路径跟踪，其准确性高、收敛速度快及设计难度低，但这些控制算法大多适用于特定的工作场景，且缺乏严谨的理论推导，暂未形成用于铰接转向车辆在多工况、复杂场景中路径跟踪的综合解决方案。对于基于智能方法优化传统控制方法的研究，虽然显著提升了传统控制方法的控制性能，但无法弥补控制方法中原理性的不足，如 PID 算法的延时及超调，LQR 控制中的控制量饱和等。总的来说，基于智能控制算法的研究具有较大的应用前景，是解决复杂环境下的铰接转向车辆路径跟踪控制问题的有效方法之一，如进一步突破铰接转向车辆在地形不均匀、障碍物复杂多样的林地等场景中自主行驶的安全性、稳定性挑战。

2.4　控制算法总结

对比各类算法在多种铰接车上的研究进展及应用场景，并从设计难易度、控制响应性能、跟踪精度、对道路曲率和路面条件干扰的适应性、对模型精度的依赖性、计算效率等角度展开分析总结，如表 3 所示。可以看到，纯跟踪、反馈线性化和 PID 控制相对来说设计简单，适用于简单的路径跟踪场景，对于变化的路况则效果不佳。滑模控制具有较强的鲁棒性和抗干扰能力，但跟踪过程的稳定性和平顺性不足。LQR 控制在系统稳定性和控制精度上表现出色，但对铰接转向车辆模型精度要求较高。模型预测控制可以考虑车辆的多约束条件，在跟踪复杂路径时性能突出，但计算复杂度较高。智能控制算法中，基于神经网络和强化学习的控制需具有良好的工况适应性，基于智能算法的控制算法优化能够提升传统控制算法的跟踪性能，但需要大量的训练数据和计算资源。可以发现，每种控制算法都有各自的优缺点，实际选择时取决于应用需求。受地形、路面条件、车辆运动非线性等影响，铰接转向车辆的路径跟踪控制算法在实际应用中存在复杂干扰和较大不确定性，如何在简单控制算法中融合智能算法，实现多工况自适应、高精度、高稳定的路径跟踪控制，是未来的研究挑战。

3　控制算法验证与评估

在控制算法开发完成后，需要对控制算法开展验证试验与性能评估，以确保控制方法的可靠性及有效性。本部分将从控制算法的验证方法、主要评估性能及其量化方法方面加以阐述。

3.1　控制算法验证

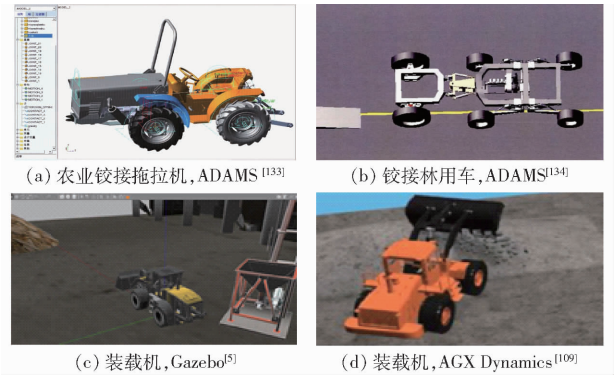
铰接转向车辆控制算法的验证方法主要包括仿真、硬件在环仿真和实车验证 3 类。

在仿真验证中，由于铰接结构的特殊性，没有类似 Carsim[131]或 Trucksim[132]的通用车辆仿真软件可用于铰接转向车辆。现有研究多数以 ADAMS 中搭建的铰接转向车辆物理模型为被控对象（如图 12a、12b），并搭建轮胎和各类道路场景（如丘陵山地的越障、坡地等），通过与 Matlab/Simulink 中构建的控制器进行数据交互，验证车辆在不同道路、参

表 3 控制算法特点与适用场景

Tab. 3 Characteristics and applicable scenarios of control algorithms

控制方法	优点	缺点	适用场景
纯跟踪控制	易于实现,参数调整简单	稳定性较差,易受路面条件、传感器响应及噪声、车辆操纵饱和等影响	简单、路径变化平缓、低速
反馈线性化控制	算力要求低且设计简便,可以设计系统的动态和稳态响应过程	车辆模型精度要求较高,易受车辆的非线性运动和路面扰动影响	需要较高精度和稳定性
滑模控制	较好的鲁棒性和快速响应特性,抗干扰能力强,对模型精度要求低	控制过程容易发生震荡	存在路面、地形扰动
LQR 最优控制	较好的稳定性和准确性	车辆模型精度、可靠性要求较高;受道路条件不佳、噪声和不确定干扰等限制	关注跟踪的快速响应、稳定性及准确性
模型预测控制	跟踪复杂路径能力和精确性较高,能处理非线性、不确定性问题	设计过程相对复杂;计算量相对较大,准确性依赖于铰接转向车辆模型的保真度	参考路径复杂,需考虑控制过程非线性、安全性约束
PID 控制	设计简单,易于调试,响应性能好,稳定性高	存在稳态误差、需要实验测试确定控制系数,易受非线性、不确定因素影响	行驶工况稳定、环境干扰低
模糊控制	不需要对车辆状态的高精度测量,对控制误差和噪声容错能力强,灵活性和适应性强	凭经验建立模糊规则,平顺性较低	无模型、变跟踪路径、低精度要求
神经网络	高容错性、泛化性、自适应能力,可以处理复杂的非线性、时变因素	设计过程复杂;需要大量的训练数据,存在较大的不确定性	需要学习控制过程的非线性、不确定性,提高控制精度
强化学习	自学习、自适应能力	训练时间长,计算资源要求高	行驶环境未知、跟踪任务复杂
智能优化算法	灵活性、自适应能力	计算复杂,增加控制复杂度	控制算法参数优化



(a) 农业铰接拖拉机,ADAMS[133] (b) 铰接林用车,ADAMS[134]

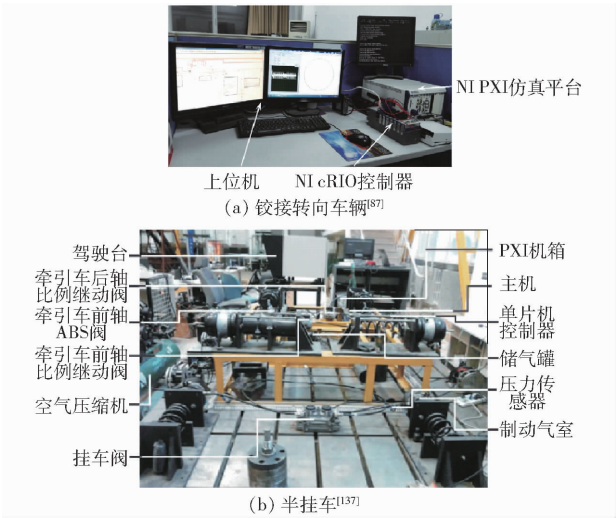
(c) 装载机,Gazebo[5] (d) 装载机,AGX Dynamics[109]

图 12 铰接转向车辆仿真界面

Fig. 12 Articulated steering vehicles simulation interface

考路径、速度等工况下的路径跟踪性能[43,49,76,96,101,109,133,135]。该方法通过精确地构建铰接转向车辆各个部件的约束及力学关系等,能够准确地模拟铰接转向车辆的运动特性。然而,其建模过程较为复杂,且 ADAMS 的仿真速度较为缓慢,因此在实时性上存在局限性[62]。为实现实时虚拟仿真, KERR 等[5]面向铰接式装载机在纸浆造纸厂的木屑搬运场景,基于 ROS 环境下的 Gazebo 软件开发了包含装载机模型及造纸厂环境的虚拟平台(图 12c),用于后续控制器的实时动态仿真验证。此外,考虑到铰接转向车辆实际工作环境中道路条件对控制算法性能的影响,SONG 等[109]联合 AGX Dynamics 与 Matlab/Simulink 开发了高保真仿真环境(图 12d),为非结构地形下不同路面坚实度、摩擦等因素下的控制算法验证提供了基础。综合来看,仿真验证方法更为直观和简易,但由于虚拟模型与实车的运动响应不完全一致,对控制算法实车落地时的有效性存在一定影响。

硬件在环仿真通过在仿真回路中引入真实的电控单元、控制箱等真实组件,如驱动电机、转向执行器或控制算法板,并通过嵌入式控制算法等实现硬件和仿真环境的数据交换及实时控制(图 13),为控制算法提供了接近真实的信号激励[136]。赵翾等[87]在 NI PXI 仿真平台以 MapleSim 中搭建的铰接式农用车模型为被控对象,联合 NI cRIO 实时控制算法进行路径跟踪控制。相对全仿真环境,硬件在环仿真更准确地模拟了车辆的物理行为,且能提供实时反馈及控制响应,可以更精确地评估算法的实时性及性能[84,87]。但该方法对硬件系统接口及模型的



(a) 铰接转向车辆[87]

(b) 半挂车[137]

图 13 硬件在环实验平台

Fig. 13 Hardware-in-the-loop experimental platform

要求较高，且验证场景受限于硬件设备和环境条件。

实车验证是将控制算法直接部署到实际的铰接转向车辆上，并在真实工作环境中进行验证和评估。它能够直接评估控制算法的实时性与响应性能，更准确地考虑车辆的物理特性、机械约束和环境因素。目前已在棉田、果园、地下巷道、矿山等场景中实现了对铰接式农用车、铲运车、压路机、装载机等铰接转向车辆的控制器实车验证（图 14），但考虑到安全和成本等因素，这些验证多在路面较为平整、行驶路径简单的驾驶场景展开[13,33,94,105,115,138]。LI 等[60]、DOU 等[123]和 CHEN 等[139]通过搭建铰接转向车辆的比例样机开展实车试验（图 15），相对真实车辆，比例样机保留了铰接转向车辆的结构特征的同时，大大缩减了车辆的尺寸，更为灵活和便于操作，降低了实车试验的成本与风险，为开展越障侧翻、上下坡等更为挑战性工况下的实车控制算法验证提供了可能。

3.2　控制算法评估

综合上述文献来看，控制算法的跟踪性能评估主要从准确性、平顺性、实时性、鲁棒性几方面展开，具体含义及其量化方法如表 4 所示。

其中，在准确性的评估中，通常引入的误差包括：位移误差（e_d）、航向误差（e_h）和曲率误差（e_c）。多数研究直接通过绘制上述位移 $e_d=\lambda\sqrt{(x_r-x)^2+(y_r-y)^2}$、航向 $e_h=\theta-\theta_r$、曲率 $e_c=\frac{1}{r}-\frac{1}{r_r}$ 等误差曲线展示控制算法的控制效果。而为了定量地比较不同控制算法的跟踪效果，可以通过比较计算位移、航向误差的最大值、均方根值等来表现控制算法的优越性。BOLIA 等[141]、CAO 等[142]、GAO 等[62]以平均路径跟踪性能 $J_1=\frac{1}{T}\int_0^T e_d^2\mathrm{d}t$、平均转向负荷 $J_2=\frac{1}{T}\int_0^T(\dot{\phi}/\dot{\phi}_r)^2\mathrm{d}t$ 来评估控制算法路径跟踪准确性和平顺性。

3.3　总结

根据验证及评估结果可进一步优化控制算法参数及结构等，以提升其跟踪性能。表 5 整理了目前具有代表性的控制算法验证及评估结果，为后续控制算法的性能评估提供了基准。



(a) 铰接式农用车棉田作业场景[13,78]

(b) 铰接式拖拉机果园作业场景[104]

(c) 铰接式铲运车地下巷道作业场景[82,112]

(d) 铰接式压路机矿山作业场景[33,115]

(e) 铰接式装载机露天采矿作业场景[64,138]

图 14　不同类型铰接转向车辆及作业场景的实车验证

Fig. 14　Real vehicle validation for different types of articulated steering vehicles and operation scenarios

4　研究挑战与展望

4.1　铰接转向车辆建模

4.1.1　考虑动力学因素，构建准确可行的铰接转向车辆模型

准确的铰接转向车辆模型是实现高效的路径跟踪的关键。在现有的路径跟踪模型中，铰接转向车辆运动学模型在各类基于模型的控制器设计中最为



图 15　铰接转向车辆样机平台[60,123,139]

Fig. 15　Articulated steering vehicles prototype platform

表 4 性能评估方法

Tab. 4 Methods of performance evaluation

评估性能	含意	量化方法
准确性	实际路径与参考路径的误差大小	路径跟踪误差
平顺性	控制车辆转向变化的平滑性,避免车辆的突然转向或剧烈震荡,如农田、压路作业时的转向工况	转向输入变化率
实时性	算法的运行速度,要求算法能够快速响应和收敛、及时更新控制指令	算法运行时间
鲁棒性	面对变工况、环境干扰时,算法稳定性和可靠性[140](如农田作业时地面条件的变化,装载机负载变化,传感器噪声、障碍物干扰等)	引入不同工况或干扰评估跟踪性能

常见,它们通常基于运动学考量,不考虑车辆的受力情况,且多为线性化的平面模型,忽略了车辆垂向、侧倾等自由度。这些模型简化程度高,虽然一定程度上能够模拟铰接转向车辆的运动,但被迫局限于低速、小幅度转向、平面路面等假设下,这限制了铰接转向车辆路径控制研究的普适性。此外,铰接转向车辆的双车体结构及铰接转向方式导致整车在转向时质心可变,且各控制状态间耦合度高,这些因素都使得车辆动力学建模异常困难。因此,如何在构建路径跟踪模型时进一步将铰接转向车辆车身结构间转向结构、传动系统、轮胎动力学纳入考量将是未来的一项挑战。

表 5 代表性路径跟踪控制验证及评估结果

Tab. 5 Representative path tracking control validation and evaluation results

对象	验证场景	算法	实验参数	精度	文献序号
铰接式农用车	农场棉田播种	纯跟踪控制-误差修正	环形路径车速 1.20 m/s	直线 e_d: 0.04 ~ 0.09 m 转弯 e_d: 0.24 m	[13]
铰接式拖拉机	果园环境	自适应 MPC	U 形路径车速 0.50 m/s	e_d: 0.02 m e_h: 0.03 rad	[104]
铰接式自卸车	模拟巷道	GA - LQR 控制	圆形路径车速 3.00 m/s	e_d: 0.03 m e_h: 0.05 rad e_c: 0	[94]
铰接式铲运机	模拟巷道	PID 控制-双偏差融合	直线/转弯车速 1.00 ~ 2.00 m/s	e_d: 0.40 ~ 0.80 m e_h: 0.06 rad	[112]
铰接式自卸车	模拟巷道	神经网络	曲线路径车速 4.00 m/s	e_d: 0.054 m e_h: 0.01 rad	[124]
铰接式压路机	颠簸施工路面	反馈线性化-预览距离控制	圆形路径车速 0.75 m/s	e_d: 0.15 m e_h: 0.20 rad e_c: 0.05 m^{-1}	[33]
铰接式压路机	颠簸施工路面	PID 控制-超参数自整定	直线路径车速 0.83 m/s	e_d: 0.017 8 ~ 0.059 1 m	[115]
铰接式装载机	V 形作业模式	自适应模型预测控制	V 形轨迹最高车速 4.00 m/s	e_d: 0.15 m e_h: 0.12 rad	[126]
铰接式农用车	硬件在环仿真	滑模控制	圆形路径车速 3.00 m/s	e_d: 0.10 m e_h: 0.21 rad e_c: 0.005 m^{-1}	[87]

4.1.2 充分利用随车传感器,考虑模型参数的动态时变特性

真实准确的模型参数是建模的基础。在铰接转向车辆建模时,常伴随大量随工况改变的模型参数。例如车体质量、车体质心等参数将会随着车辆的载荷情况不同而改变;路面附着系数以及路面起伏等参数将会随着行驶路况不同而改变。然而,由于生产成本及应用场景的限制,铰接转向车辆一般不具有乘用车上常见的安全检测系统,缺少悬架传感器和轮矩传感器等关键力学传感器。仅依靠加速度计、轮速计等基础传感器推算上述参数将涉及车-轮-路间的复杂受力关系,极大增加了参数获取难度。因此,如何基于有限的传感信号构建考虑铰接转向车辆特性的多参数动态识别方法,对于搭建铰接转向车辆模型十分关键。

4.2 控制算法开发

4.2.1 突破适应工况的局限性,开发满足多工况鲁棒性要求的集成控制算法

这是目前铰接转向车辆控制算法研究中的重要挑战之一。现有的研究中,简单的运动学控制算法大多是面向单一工况展开设计,虽然设计简单,计算简便,但忽略了道路坡度、曲率及车辆速度等参数的影响,导致其在多行驶工况下的性能难以保证。而基于复杂算法和动力学模型的控制算法具有良好的

适应性，但在计算效率和实时性上难以保证。因此，需要结合各类控制算法的适用特点，集成设计一种多工况下自适应的控制算法，以满足控制算法在不同速度、道路曲率、路面条件等多工况的鲁棒性要求。

4.2.2 突破控制目标的单一性，开发面向真实应用的多优化目标控制器

当前铰接转向车辆的路径跟踪研究普遍基于基础的路径跟踪精度需求设计控制算法，而面向实际作业需求的优化目标仍然较少被考虑。例如物料运输时通常要求铰接转向车辆的车身稳定性以减少物料抖落；重载铰接转向车辆作业时往往需要考虑车辆的倾翻安全性。虽然已有研究从车辆稳定性、安全性等角度对车辆进行分析，但由于该类研究通常采用不同的简化假设或仅针对车辆理论分析，不具备实时计算的能力，使得这些成果难以直接应用于路径跟踪控制中。因此如何将这些实际应用目标融入路径跟踪控制中仍然是当前的一项重大挑战。

4.3 控制算法的验证与评估

4.3.1 构建高保真铰接转向车辆仿真模型，实现标准化、流程化的控制器验证

在仿真场景中搭建铰接转向车辆模型和各类工况是一种低成本、高效率的控制算法验证方法。目前对于铰接转向车辆的仿真高度依赖于 ADAMS 等通用动力学仿真平台，仿真过程中涉及模型构建、运动约束、预设环境参数及控制输入等大量自定义过程。这种仿真方式与专业车辆仿真软件相比，缺乏统一的仿真环境构建流程，仿真参数的设定也缺乏相应的标准化约束。此外，铰接转向车辆行驶的非结构地形存在道路摩擦、坑洼凹陷等各种干扰因素，这些因素与车辆的动态耦合关系表征困难，导致路面激励下车辆响应的拟真度难以保证。

4.3.2 开发面向实车的控制算法验证系统，实现控制算法在实车上的应用

实车应用是控制器开发的最终目的，且来自实车的真实信息能够进一步为仿真场景的验证与优化提供依据。因此，实车上的铰接转向车辆控制器验证系统开发十分关键。然而相较于乘用车，铰接转向车辆的实车实验门槛更高。一方面铰接转向车辆实验需要具备一定的场地及硬件设施基础，且进行实验的车辆一般需要进行专门的实验改装，实验成本较高；另一方面铰接转向车辆作为专项作业车辆，操作难度较高，实车实验过程中存在一定的安全隐患。因此实车控制验证系统的开发仍然是目前所面临的一大关键挑战。

4.4 总体挑战与发展前景

综合来说，铰接转向车辆的路径跟踪控制仍面临以下挑战与不足：在建模阶段，缺乏考虑铰接转向车辆自身结构的非线性、地面对车辆的复杂激励、关键模型参数的动态时变影响等多因素的建模方法。在控制方法的开发阶段，需突破控制算法在复杂恶劣的道路条件、变工况、变速度下的跟踪控制性能。在控制算法的验证阶段，缺乏以铰接转向车辆为控制对象的高保真、标准化仿真环境，且对铰接转向车辆实车上控制算法的开发研究较少。

基于上述的研究挑战，提出未来铰接转向车辆路径跟踪控制相关技术的关键研究方向：

4.4.1 实时参数动态识别与估计

现有研究缺乏用于铰接转向车辆路径跟踪控制的各项路面参数、车辆完整状态信息的获取方法。由于路面对铰接转向车辆路径跟踪的影响难以忽略，为及时更正控制性能，对路面坚实度、滑移、高程等参数的动态识别十分重要。此外，为确保输入控制算法信息的完整性与可靠性，现有研究主要基于多种高精度传感器获取车辆的状态信息，而为实现低成本、高性能的状态参数获取，研究铰接转向车辆状态参数的估计方法具有关键性意义。此外，如何实时地获取、处理、传输上述识别与估计结果，以满足控制的实时性要求，也是未来的一大研究方向。

4.4.2 基于智能算法的多工况自适应控制

针对当前铰接转向车辆模型和控制算法框架本身的局限性，在未来的研究中，基于智能算法的控制算法设计将提供一个具有前景的解决方案，以实现铰接转向车辆在多工况、复杂变化行驶条件中的自适应控制。现有智能算法中，神经网络和强化学习在处理非线性系统、自学习、自适应的能力上十分突出。在普通车辆的跟踪控制中，这些算法已经在复杂地形下、多干扰环境中展现了强大的控制性能[125,143-144]。因此，未来如何更进一步拓展这些算法在铰接转向车辆路径跟踪中的应用场景，是一个重大的研究方向。

4.4.3 考虑多性能的集成化控制

目前对铰接转向车辆路径跟踪控制的研究主要关注于控制精度和实时性的提升，较少考虑到控制过程中车辆的稳定性和安全性，而整车的稳定安全是确保控制系统有效可行的前提。因此，未来研究中需要综合考虑控制过程中的准确性、稳定性、安全性等多个性能，如在控制算法的评估中融合表示铰接转向车辆稳定性和安全性的量化与评估指标[139,145-146]，以实现考虑多性能的集成化控制，对实现安全平稳的路径跟踪控制具有重要的意义。

参 考 文 献

[1] VIDONI R, BIETRESATO M, GASPARETTO A, et al. Evaluation and stability comparison of different vehicle configurations for robotic agricultural operations on side-slopes[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 197 – 211.

[2] MAZZETTO F, BIETRESATO M, GASPARETTO A, et al. Simulated stability tests of a small articulated tractor designed for extreme-sloped vineyards[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2013, 44: 663 – 668.

[3] FUE K, PORTER W, BARNES E, et al. Center-articulated hydrostatic cotton harvesting rover using visual-servoing control and a finite state machine[J]. Electronics, 2020, 9(8): 1226.

[4] SUN Z, ZHANG D, LI Z, et al. Optimum design and trafficability analysis for an articulated wheel-legged forestry chassis[J]. Journal of Mechanical Design, 2022, 144(1): 013301.

[5] KERR M A, NASRALLAH D S, KWOK T H. First steps toward the development of virtual platform for validation of autonomous wheel loader at pulp-and-paper mill: modelling, control and real-time simulation[C]//2021 IEEE International Conference on Autonomous Systems (ICAS), 2021.

[6] ALTAFINI C. Why to use an articulated vehicle in underground mining operations? [C]// Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 99CH36288C). IEEE, 1999: 3020 – 3025.

[7] UNO K, IMAIE K, MAEKAWA K, et al. Development of mining machinery and future outlook for electrification[J]. Hitachi Review, 2013, 62(2): 99 – 106.

[8] SUZUKI T, OHNO K, KOJIMA S, et al. Estimation of articulated angle in six-wheeled dump trucks using multiple GNSS receivers for autonomous driving [J]. Advanced Robotics, 2021, 35(23): 1376 – 1387.

[9] 王连其,陈荣文,高巧明,等. 对丘陵山地铰接轮式拖拉机的思考[J]. 拖拉机与农用运输车,2020,47(6):1 – 4.
WANG Lianqi, CHEN Rongwen, GAO Qiaoming, et al. Thoughts on articulated wheeled tractors in hilly areas [J]. Tractor & and Farm Transporter, 2020, 47(6): 1 – 4. (in Chinese)

[10] 沈红光. 高地隙折腰式水田动力底盘设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2017.
SHEN Hongguang. Design and experiment of high-clearance roll-waist power chassis for paddy field[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[11] 李赫,赵弋秋,秦超斌,等. 折腰转向无人驾驶植保车控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):544 – 553.
LI He, ZHAO Yiqiu, QIN Chaobin, et al. Design and test of control system of articulated steering unmanned plant protection vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 544 – 553. (in Chinese)

[12] 秦伟桦,冉云亮,朱晨辉,等. 自主行走植保车的设计与试验研究[J]. 农业装备与车辆工程,2021,59(7):19 – 23.
QIN Weihua, RAN Yunliang, ZHU Chenhui, et al. Design and experimental study of self-propelled plant protection vehicles [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2021, 59(7): 19 – 23. (in Chinese)

[13] FUE K, PORTER W, BARNES E, et al. Autonomous navigation of a center-articulated and hydrostatic transmission rover using a modified pure pursuit algorithm in a cotton field[J]. Sensors, 2020, 20(16): 4412.

[14] 邹学耀. 露天矿无人驾驶自卸车横-纵向协同控制方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学,2022.
ZOU Xueyao. Research on lateral and longitudinal cooperative control method of driverless dump truck in open pit mines [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022. (in Chinese)

[15] 姚冬春. 面向无人驾驶碾压机的横纵向运动协调控制研究[D]. 天津:天津大学,2018.
YAO Dongchun. Research on lateral and longitudinal control of self-driving vibratory roller[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)

[16] LI J, ZHAN K. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment[J]. Engineering, 2018, 4(3): 381 – 391.

[17] GU Q, LIU L, BAI G, et al. Longitudinal and lateral trajectory planning for the typical duty cycle of autonomous load haul dump[J]. IEEE Access, 2019, 7: 126679 – 126695.

[18] JIANG Y, HE X. Overview of applications of the sensor technologies for construction machinery[J]. IEEE Access, 2020, 8: 110324 – 110335.

[19] CHEN Z, WANG D, CHEN G, et al. A hybrid path planning method based on articulated vehicle model[J]. Comput. Mater. Contin, 2020, 65: 1781 – 1793.

[20] XIAO W, LIU M, CHEN X. Research status and development trend of underground intelligent load-haul-dump vehicle—a comprehensive review[J]. Applied Sciences, 2022, 12(18): 9290.

[21] 杨春雨,张鑫. 煤矿机器人环境感知与路径规划关键技术[J]. 煤炭学报,2022,47(7):2844 – 2872.
YANG Chunyu, ZHANG Xin. Key technologies of coal mine robots for environmental perception and path planning[J]. Journal of China Coal Society, 2022,47(7): 2844 – 2872. (in Chinese)

[22] 徐明泽,刘清河. 基于 LQR 和 PID 的智能车轨迹跟踪控制算法设计与仿真[J]. 太原理工大学学报,2022,53(5):877 – 885.
XU Mingze, LIU Qinghe. Design and simulation of intelligent vehicle trajectory tracking control algorithm based on LQR and PID[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2022, 53(5): 877 – 885. (in Chinese)

[23] 何心,徐武彬,李冰,等. 铰接轮式装载机的模型预测轨迹跟踪研究[J/OL]. 计算机集成制造系统,http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20230322.1727.020.html.

[24] 熊璐,杨兴,卓桂荣,等. 无人驾驶车辆的运动控制发展现状综述[J]. 机械工程学报,2020,56(10):127 – 143.

XIONG Lu, YANG Xing, ZHUO Guirong, et al. Review on motion control of autonomous vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(10):127 – 143. (in Chinese)

[25] 白国星,罗维东,刘立,等. 矿用铰接式车辆路径跟踪控制研究现状与进展[J]. 工程科学学报,2021,43(2):193 – 204.
BAI Guoxing, LUO Weidong, LIU Li, et al. Current status and progress of path tracking control for mining articulated vehicles [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(2): 193 – 204. (in Chinese)

[26] MCCARTHY S G, POCKNEE S, RAINS G, et al. Path following studies with an articulated farm vehicle [C]// Automation Technology for Off-Road Equipment Proceedings of the 2004 Conference, 2004.

[27] STEELE J P H, GANESH C, KLEVE A. Control and scale model simulation of sensor-guided LHD mining machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(6): 1232 – 1238.

[28] CORKE P I, RIDLEY P. Steering kinematics for a center-articulated mobile robot[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(2): 215 – 218.

[29] RIDLEY P, CORKE P. Load haul dump vehicle kinematics and control[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2003, 125(1): 54 – 59.

[30] NAYL T, NIKOLAKOPOULOS G, GUSTAFSSON T. Kinematic modeling and simulation studies of a LND vehicle under slip angles[C]// International Conference on Modelling, Simulation and Identification, 2011: 344 – 349.

[31] NAYL T, NIKOLAKOPOULOS G, GUSTAFSSON T. Path following for an articulated vehicle based on switching model predictive control under varying speeds and slip angles[C]// Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012). IEEE, 2012: 1 – 7.

[32] NAYL T, NIKOLAKOPOULOS G, GUSTAFSSON T. A full error dynamics switching modeling and control scheme for an articulated vehicle[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2015, 13: 1221 – 1232.

[33] YANG M, BIAN Y, LIU G, et al. Path tracking control of an articulated road roller with sideslip compensation[J]. IEEE Access, 2020, 8: 127981 – 127992.

[34] SCHEDING S, DISSANAYAKE G, NEBOT E M, et al. An experiment in autonomous navigation of an underground mining vehicle[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(1): 85 – 95.

[35] YOON J H, PENG H. Sideslip angle estimation based on GPS and magnetometer measurements[C]// Proceeding of 11th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2012.

[36] YOON J H, PENG H. A cost-effective sideslip estimation method using velocity measurements from two GPS receivers[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 63(6): 2589 – 2599.

[37] MORRISON G, CEBON D. Sideslip estimation for articulated heavy vehicles at the limits of adhesion[J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54(11): 1601 – 1628.

[38] ZHANG B, DU H, LAM J, et al. A novel observer design for simultaneous estimation of vehicle steering angle and sideslip angle [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4357 – 4366.

[39] HUANG Y, BAO C, WU J, et al. Estimation of sideslip angle based on extended Kalman filter[J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2017, 2017: 1 – 9.

[40] LIAO Y W, BORRELLI F. An adaptive approach to real-time estimation of vehicle sideslip, road bank angles, and sensor bias [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 7443 – 7454.

[41] 刘培祥. 四轮独立驱动铰接车辆转向节能控制[D]. 长春:吉林大学,2020.
LIU Peixiang. Steering energy-saving control of four-wheel independent-drive articulated vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)

[42] LEI T, WANG J, YAO Z. Modelling and stability analysis of articulated vehicles[J]. Applied Sciences, 2021, 11(8): 3663.

[43] SHAHIRPOUR A, ABEL D. Simulation and successive sideslip-compensating model predictive control for articulated dump trucks [C]//2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2022: 3907 – 3913.

[44] LASHGARIAN A N, KHAJEPOUR A, MCPHEE J. Robust state feedback stabilization of articulated steer vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(3): 249 – 275.

[45] GAO Y, SHEN Y, XU T, et al. Oscillatory yaw motion control for hydraulic power steering articulated vehicles considering the influence of varying bulk modulus[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 27(3): 1284 – 1292.

[46] 白国星. 四轮独立驱动铰接车自主行驶控制研究[D]. 北京:北京科技大学,2020.
BAI Guoxing. Research on autonomous driving control of four-wheel independently drive articulated vehicles [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020. (in Chinese)

[47] 沈凯凯. 基于并联模拟驾驶平台的装载机动力学建模及控制[D]. 秦皇岛:燕山大学,2019.
SHEN Kaikai. Research on dynamic modeling and control of loader based on parallell simulated driving platform optimal[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019. (in Chinese)

[48] 田均春,申焱华,钟奇龙. 分布式驱动铰接车路径跟踪及差动协调控制[C]//2021 中国自动化大会论文集,2021:453 – 458.
TIAN Junchun, SHEN Yanhua, ZHONG Qilong. Path tracking of distributed drive articulated vehicle coordinated with differential torque[C]// Proceedings of the 2021 Chinese Automation Conference, 2021: 453 – 458. (in Chinese)

[49] YANG F, CAO X, XU T, et al. A skid-steering method for path-following control of distributed-drive articulated heavy vehicles[J]. IEEE Access, 2022, 10: 31538 – 31547.

[50] 崔胜民,张京明,张为春. 铰接式车辆稳态转向特性[J]. 拖拉机与农用运输车,1995(3):43 – 46.

CUI Shengmin, ZHANG Jingming, ZHANG Weichun. Steady-state steering characteristics of articulated vehicles[J]. Tractor & Farm Transporter, 1995(3): 43 - 46. (in Chinese)

[51] AZAD N L, KHAJEPOUR A, MCPHEE J. Effects of locking differentials on the snaking behaviour of articulated steer vehicles [J]. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, 2007, 2(2): 101 - 127.

[52] 张杨,刘昕晖. 铰接车体转向横摆稳定性[J]. 吉林大学学报(工学版),2012,42(2):266 - 271.
ZHANG Yang, LIU Xinhui. Yaw stability for steering motion of articulated vehicle[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2012, 42(2): 266 - 271. (in Chinese)

[53] PAZOOKI A, RAKHEJA S, CAO D. Kineto-dynamic directional response analysis of an articulated frame steer vehicle[J]. International Journal of Vehicle Design, 2014, 65(1): 1 - 30.

[54] XU T, SHEN Y, HUANG Y, et al. Study of hydraulic steering process for articulated heavy vehicles based on the principle of the least resistance[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(4): 1662 - 1673.

[55] PENG D, FANG K, KUANG J, et al. Conflict and sensitivity analysis of articulated vehicle lateral stability based on single-track model[J]. Shock and Vibration, 2021,2021: 5893993.

[56] LEI T, GU X, ZHANG K, et al. PSO-based variable parameter linear quadratic regulator for articulated vehicles snaking oscillation yaw motion control[C]// Actuators. MDPI, 2022: 337.

[57] DOU F, LIU W, HUANG Y, et al. Modeling and path tracking for articulated steering vehicles[C]// 2017 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 2017: 5263 - 5268.

[58] 窦凤谦. 地下矿用铰接车路径跟踪与智能避障控制研究[D]. 北京:北京科技大学,2018.
DOU Fengqian. Research on path tracking and obstacle avoidance for underground mining articulated vehicles[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing , 2018. (in Chinese)

[59] BADAR T, BACKMAN J, TARIQ U, et al. Nonlinear 6-DOF dynamic simulations for center-articulated vehicles with combined CG[J]. IFAC - PapersOnLine, 2022, 55(14): 95 - 100.

[60] LI X, WANG G, YAO Z, et al. Dynamic model and validation of an articulated steering wheel loader on slopes and over obstacles[J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(9): 1305 - 1323.

[61] 高玉. 铰接式工程车辆操纵稳定性控制与可视化模型开发[J]. 北京:北京科技大学,2018.
GAO Yu. Handling and stability control of articulated steer vehicles and virtual reality model development[J]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018. (in Chinese)

[62] GAO Y, CAO D, SHEN Y. Path-following control by dynamic virtual terrain field for articulated steer vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 58(10): 1528 - 1552.

[63] HE Y, KHAJEPOUR A, MCPHEE J, et al. Dynamic modelling and stability analysis of articulated frame steer vehicles[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2005, 12(1): 28 - 59.

[64] 石钧仁,孙冬野,秦大同,等. 装载机避障轨迹规划及模型预测轨迹跟踪[J]. 中国公路学报,2021,34(5):224 - 236.
SHI Junren, SUN Dongye, QIN Datong, et al. Obstacle avoidance trajectory planning and model-predicted trajectory tracking of wheel loaders[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(5): 224 - 236. (in Chinese)

[65] 刘刚,朱诗顺,黄玲珍,等. 铰接车辆在不平道路行驶的动力学仿真[J]. 中国公路学报,1996,9(4):111 - 117.
LIU Gang, ZHU Shishun, HUANG Lingzhen, et al. The method of dynamic processing simulation of articulated vehicle[J]. China Journal of Highway and Transport, 1996, 9(4): 111 - 117. (in Chinese)

[66] GAO L, DONG Y, ZHAO J. Dynamic modeling and characteristic analysis of articulated steering vehicles[J]. Applied Sciences, 2023, 13(8): 5099.

[67] YAVIN Y. Modelling the motion of an underground mining vehicle[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2005, 42(9 - 10): 1123 - 1130.

[68] DRAGT B J, CAMISANI-CALZOLARI F R, CRAIG I K. Modelling the dynamics of a load-haul-dump vehicle[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2005, 38(1): 49 - 54.

[69] AZAD N L, MCPHEE J, KHAJEPOUR A. Tire forces and moments and on-road lateral stability of articulated steer vehicles [C]. SAE Technical Paper, 2005.

[70] ALSHAER B J, DARABSEH T T, MOMANI A Q. Modelling and control of an autonomous articulated mining vehicle navigating a predefined path[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2014, 21(2): 152 - 168.

[71] DAHER N, IVANTYSYNOVA M. A virtual yaw rate seklnsor for articulated vehicles featuring novel electro-hydraulic steer-by-wire technology[J]. Control Engineering Practice, 2014, 30: 45 - 54.

[72] 王巍,陈建设. 基于特征值判定法铰接车行驶稳定性建模分析[J]. 机械设计与制造,2019(8):211 - 215.
WANG Wei, CHEN Jianshe. Modeling and analysis on handing stability of articulated vehicle based on the eigenvalue method [J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(8): 211 - 215. (in Chinese)

[73] 陈阿龙. 铰接式工程车辆侧翻稳定性分析及其控制[D]. 厦门:厦门理工学院,2019.
CHEN Along. Rollover stability analysis and anti-rollover control of articulated construction vehicles[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2019. (in Chinese)

[74] 何家寿. 60 吨铰接式电动轮自卸车差速控制策略研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.
HE Jiashou. Differential control strategy research of 60 tons articulated dump truck with electric wheels[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)

[75] 姚强强. 自动驾驶汽车行驶状态观测与路径跟踪控制策略研究[D]. 北京:北京交通大学,2022.
YAO Qiangqiang. Research on driving states observation and path tracking control strategy for autonomous vehicle[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022. (in Chinese)

[76] LI S, WANG X, CUI G, et al. Yaw and lateral stability control based on predicted trend of stable state of the vehicle[J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(1): 111 - 127.

[77] SNIDER J M. Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2009.

[78] RAINS G C, FAIRCLOTH A G, THAI C, et al. Evaluation of a simple pure pursuit path-following algorithm for an autonomous, articulated-steer vehicle[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2014, 30(3): 367 - 374.

[79] YAO D, XIE H, QIANG W, et al. Accurate trajectory tracking with disturbance-resistant and heading estimation method for self-driving vibratory roller[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(31): 754 - 758.

[80] DESANTIS R M. Modeling and path-tracking for a load-haul-dump mining vehicle[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1997, 119(1): 40 - 47.

[81] BIGRAS P, PETROV P, WONG T. A LMI approach to feedback path control for an articulated mining vehicle[C]// International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems(IMACS), 2002:1 - 6.

[82] MARSHALL J, BARFOOT T, LARSSON J. Autonomous underground tramming for center-articulated vehicles[J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25(6 - 7): 400 - 421.

[83] BIAN Y, YANG M, FANG X, et al. Kinematics and path following control of an articulated drum roller[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(4): 888 - 899.

[84] ZHAO X, YANG J, ZHANG W, et al. Feedback linearization control for path tracking of articulated dump truck[J]. Telecommunication Computing Electronics and Control, 2015, 13(3): 922 - 929.

[85] DEKKER L G, MARSHALL J A, LARSSON J. Experiments in feedback linearized iterative learning-based path following for center-articulated industrial vehicles[J]. Journal of Field Robotics, 2019, 36(5): 955 - 972.

[86] ZHENG Y, LIU J, LIU X, et al. Adaptive second-order sliding mode control design for a class of nonlinear systems with unknown input[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015,2015: 319495.

[87] 赵翾,杨珏,张文明,等.农用轮式铰接车辆滑模轨迹跟踪控制算法[J].农业工程学报,2015,31(10):198 - 203.
ZHAO Xuan, YANG Jue, ZHANG Wenming, et al. Sliding mode control algorithm for path tracking of articulated dump truck[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 198 - 203. (in Chinese)

[88] NAYL T, NIKOLAKOPOULOS G, GUSTAFSSON T, et al. Design and experimental evaluation of a novel sliding mode controller for an articulated vehicle[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 103: 213 - 221.

[89] 武涛,李彦明,林洪振,等.基于干扰观测器的直播机路径跟踪快速终端滑模控制[J].农业机械学报,2021,52(12): 24 - 31.
WU Tao, LI Yanming, LIN Hongzhen, et al. Fast terminal mode control for autonomous rice seeding machine based on disturbance observer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 24 - 31. (in Chinese)

[90] NEACŞU D O, SIRBU A. Design of a LQR-based boost converter controller for energy savings[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(7): 5379 - 5388.

[91] ZHANG Y, ZHAO C, WANG Z, et al. Research on LHD (scraper) path tracking control based on LQR and predict pose information[J/OL]. Electrical and Electronic Engineering, 2021. https://doi.org/10.20944/preprints202106.0523.vl.

[92] WOOD S N. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology, 2011, 73(1): 3 - 36.

[93] YU H, ZHAO C, LI S, et al. Pre-work for the birth of driver-less scraper (LHD) in the underground mine: the path tracking control based on an LQR controller and algorithms comparison[J]. Sensors, 2021, 21(23): 7839.

[94] MENG Y, GAN X, WANG Y, et al. LQR - GA controller for articulated dump truck path tracking system[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2019(1): 78 - 85.

[95] 孟宇,汪钰,顾青,等.基于预见位姿信息的铰接式车辆 LQR - GA 路径跟踪控制[J].农业机械学报,2018,49(6): 375 - 384.
MENG Yu, WANG Yu, GU Qing, et al. LQR - GA path tracking control of articulated vehicle based on predictive information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 375 - 384. (in Chinese)

[96] DOU F, HUANG Y, LIU L, et al. Path planning and tracking for autonomous mining articulated vehicles[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2019, 26(3 - 4): 315 - 333.

[97] NAYL T, NIKOLAKOPOULOS G, GUSTAFSSON T. On-line path planning for an articulated vehicle based on model predictive control[C]//2013 IEEE International Conference on Control Applications (CCA). IEEE, 2013: 772 - 777.

[98] NAYL T, NIKOLAKOPOULOS G, GUSTAFSSON T. Effect of kinematic parameters on MPC based on-line motion planning for an articulated vehicle[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2015, 70: 16 - 24.

[99] NAYL T, NIKOLAKOPOULOS G, GUSTFSSON T. Switching model predictive control for an articulated vehicle under varying slip angle[C]//2012 20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED). IEEE, 2012: 890 - 895.

[100] 孟宇,甘鑫,白国星.基于预瞄距离的地下矿用铰接车路径跟踪预测控制[J].工程科学学报,2019,41(5):662 - 671.

MENG Yu, GAN Xin, BAI Guoxing. Path following control of underground mining articulated vehicle based on the preview control method[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(5): 662 - 671. (in Chinese)

[101] 李斯旭,徐彪,胡满江,等.基于动力学模型预测控制的铰接车辆多点预瞄路径跟踪方法[J].汽车工程,2021,43(8):1187 - 1194.
LI Sixu, XU Biao, HU Manjiang, et al. A dynamic model predictive control approach for multipoint preview path tracking of articulated vehicles[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(8): 1187 - 1194. (in Chinese)

[102] SHI J, SUN D, QIN D, et al. Planning the trajectory of an autonomous wheel loader and tracking its trajectory via adaptive model predictive control[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 131: 103570.

[103] BAI G, LIU L, MENG Y, et al. Path tracking of mining vehicles based on nonlinear model predictive control[J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1372.

[104] ZHOU B, SU X, YU H, et al. Research on path tracking of articulated steering tractor based on modified model predictive control[J]. Agriculture, 2023, 13(4): 871.

[105] XU T, JI X, LIU Y, et al. Differential drive based yaw stabilization using MPC for distributed-drive articulated heavy vehicle [J]. IEEE Access, 2020, 8: 104052 - 104062.

[106] YU J, SHARMA T, HE Y. Design optimization of autonomous steering control schemes for articulated vehicles[C]// Proceedings of the Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress, 2021: 27 - 30.

[107] SHEN C, BUCKHAM B, SHI Y. Modified C/GMRES algorithm for fast nonlinear model predictive tracking control of AUVs [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 25(5): 1896 - 1904.

[108] 白国星,刘丽,孟宇,等.基于非线性模型预测控制的移动机器人实时路径跟踪[J].农业机械学报,2020,51(9):47 - 52.
BAI Guoxing, LIU Li, MENG Yu, et al. Real-time path tracking of mobile robot based on nonlinear model predictive control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 47 - 52. (in Chinese)

[109] SONG R, YE Z, WANG L, et al. Autonomous wheel loader trajectory tracking control using LPV - MPC[C]// 2022 American Control Conference (ACC). IEEE, 2022: 2063 - 2069.

[110] ABAJO M R, SIERRA-GARCÍA J E, SANTOS M. Evolutive tuning optimization of a PID controller for autonomous path-following robot[C]// 16th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (SOCO 2021), 2022: 451 - 460.

[111] SASIADEK J Z, LU Y. Path tracking of an autonomous LHD articulated vehicle[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2005, 38(1): 55 - 60.

[112] 李建国,战凯,石峰,等.基于最优轨迹跟踪的地下铲运机无人驾驶技术[J].农业机械学报,2015,46(12):323 - 328.
LI Jianguo, ZHAN Kai, SHI Feng, et al. Auto-driving technology for underground scraper based on optimal trajectory tracking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 323 - 328. (in Chinese)

[113] 邵俊恺,赵翾,杨珏,等.无人驾驶铰接式车辆强化学习路径跟踪控制算法[J].农业机械学报,2017,48(3):376 - 382.
SHAO Junkai, ZHAO Xuan, YANG Jue, et al. Reinforcement learning algorithm for path following control of articulated vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 376 - 382. (in Chinese)

[114] TAN S, ZHAO X, YANG J, et al. A path tracking algorithm for articulated vehicle: development and simulations[C]// 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). IEEE, 2017: 1 - 6.

[115] GUAN S, WANG J, WANG X, et al. Dynamic hyperparameter tuning-based path tracking control for robotic rollers working on earth-rock dam under complex construction conditions[J]. Automation in Construction, 2022, 143: 104576.

[116] LIU Y J, ZHAO W, LIU L, et al. Adaptive neural network control for a class of nonlinear systems with function constraints on states[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 34(6): 2732 - 2741.

[117] 沈跃,张亚飞,刘慧,等.农业装备自动控制技术研究综述[J].农业机械学报,2023,54(8):1 - 18.
SHEN Yue, ZHANG Yafei, LIU Hui, et al. Research review of agricultural equipment automatic control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 1 - 18. (in Chinese)

[118] HUANG W, JI X, WANG A, et al. Straight-line path tracking control of agricultural tractor-trailer based on fuzzy sliding mode control[J]. Applied Sciences, 2023, 13(2): 872.

[119] ZHAO S, WANG L, ZHAO Z, et al. Study on the autonomous walking of an underground definite route lhd machine based on reinforcement learning[J]. Applied Sciences, 2022, 12(10): 5052.

[120] SHAN Y, ZHENG B, CHEN L, et al. A reinforcement learning-based adaptive path tracking approach for autonomous driving [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 10581 - 10595.

[121] AL-DAHHAN M R H, ALI M M. Path tracking control of a mobile robot using fuzzy logic[C]// 2016 13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). IEEE, 2016: 82 - 88.

[122] NORRIS W R, ZHANG Q, SREENIVAS R S. Rule-base reduction for a fuzzy human operator performance model[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(4): 611 - 618.

[123] DOU F, MENG Y, LIU L, et al. A novel relative navigation control strategy based on relation space method for autonomous underground articulated vehicles[J]. Journal of Control Science and Engineering, 2016, 2016: 2352805.

[124] 张文明,韩泓冰,杨珏,等.基于驾驶员行为的神经网络无人驾驶控制[J].华南理工大学学报(自然科学版),2016,44(12):74 - 80.
ZHANG Wenming, HAN Hongbing, YANG Jue, et al. Neural network unmanned driving control based on driver behavior

[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(12): 74 – 80. (in Chinese)
[125] WIBERG V, WALLIN E, NORDFJELL T, et al. Control of rough terrain vehicles using deep reinforcement learning[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 7(1): 390 – 397.
[126] 石钧仁.基于驾驶数据的轮式装载机行驶轨迹规划与轨迹跟踪控制研究[D].重庆:重庆大学,2021.
SHI Junren. Trajectory planning and tracking control of wheel loaders based on driving data[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)
[127] ROKONUZZAMAN M, MOHAJER N, NAHAVANDI S. Effective adoption of vehicle models for autonomous vehicle path tracking: a switched MPC approach[J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(5): 1236 – 1259.
[128] XIE H, GAO Y, SONG K. Path-following control for connected self-driving rollers with preview distance online optimization [C]//2020 39th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2020: 5559 – 5565.
[129] HUANG J, CHENG X, SHEN Y, et al. Deep learning-based prediction of throttle value and state for wheel loaders[J]. Energies, 2021, 14(21): 7202.
[130] ZHANG K, WANG J, XIN X, et al. A survey on learning-based model predictive control: toward path tracking control of mobile platforms[J]. Applied Sciences, 2022, 12(4): 1995.
[131] 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.
[132] KIM K, GUAN H, WANG B, et al. Active steering control strategy for articulated vehicles[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2016, 17(6): 576 – 586.
[133] FILLA R. An event-driven operator model for dynamic simulation of construction machinery[C]//The Ninth Scandinavian International Conference on Fluid Power, 2005.
[134] 张开兴,张斓,李政平,等.轮式丘陵山地拖拉机扭腰姿态调整装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(6):425 – 433.
ZHANG Kaixing, ZHANG Lan, LI Zhengping, et al. Design and test of twisting and swinging attitude adjustment device of wheel hilly tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 425 – 433. (in Chinese)
[135] 王振.三自由度铰接林用底盘稳定性仿真研究[D].北京:北京林业大学,2018.
WANG Zhen. Simulation research on the stability of three-degree-of-freedom articulated forest chassis[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018. (in Chinese)
[136] XU T, LIU Y, CAO X, et al. Cascaded steering control paradigm for the lateral automation of heavy commercial vehicles [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 8(2): 2346 – 2360.
[137] 聂枝根,王万琼,宗长富,等.基于线性变参数实时简化模型的重型半挂车稳定性控制策略[J].中国公路学报, 2018, 31(1):128 – 136.
NIE Zhigen, WANG Wanqiong, ZONG Changfu, et al. Stability control strategy for articulated heavy vehicles based on linear simplified model with real-time parameters[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(1): 128 – 136. (in Chinese)
[138] KOYACHI N, SARATA S. Unmanned loading operation by autonomous wheel loader[C]//2009 ICCAS-SICE. IEEE, 2009: 2221 – 2225.
[139] CHEN X, CHEN W, HOU L, et al. A novel data-driven rollover risk assessment for articulated steering vehicles using RNN [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34: 2161 – 2170.
[140] BOTES W, BOTHA T R, ELS P S. Real-time lateral stability and steering characteristic control using non-linear model predictive control[J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(4): 1063 – 1085.
[141] BOLIA P, WEISKIRCHER T, MÜLLER S. Driver steering model for closed-loop steering function analysis[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(Supp. 1): 16 – 30.
[142] CAO H, SONG X, ZHAO S, et al. An optimal model-based trajectory following architecture synthesising the lateral adaptive preview strategy and longitudinal velocity planning for highly automated vehicle[J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(8): 1143 – 1188.
[143] XIAO X, LIU B, WARNELL G, et al. Motion planning and control for mobile robot navigation using machine learning: a survey[J]. Autonomous Robots, 2022, 46(5): 569 – 597.
[144] 张守武,王恒,陈鹏,等.神经网络在无人驾驶车辆运动控制中的应用综述[J].工程科学学报,2022,44(2):235 – 243.
ZHANG Shouwu, WANG Heng, CHEN Peng, et al. Overview of the application of neural networks in the motion of unmanned vehicles[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(2): 235 – 243. (in Chinese)
[145] ZHU Q, YANG C, HU H, et al. Building a novel dynamics rollover model for critical instability state analysis of articulated multibody vehicles[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2021, 28(3): 329 – 352.
[146] SHUNJIE W, QIANJIE L, WEI C, et al. An optimized rollover index for articulated steering vehicle on slopes[C]//2020 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture (AIAM). IEEE, 2020: 191 – 194.