

# Vehicle Kinematics Modeling and Verification Analysis Based on MATLAB and CarSim

Jiyun Chen

Nantong Vocational College of Science and Technology, Nantong, Jiangsu, 226007, China

## Abstract

The vehicle kinematic model, characterized by simple structure, low computational cost, and strong robustness, has broad application value in low-to-medium speed autonomous driving and embedded platforms with limited computing power. This paper derives the kinematic model from geometric constraints and validates it using Carsim/Simulink co-simulation. By comparing the model output with the simulation trajectory of the Carsim high-precision vehicle model, the results show that under low-speed conditions, the output of the kinematic model maintains high consistency with the benchmark trajectory, with the maximum lateral error within an acceptable range, validating the effectiveness and engineering practicability of the proposed model.

## Keywords

vehicle kinematic model; co-simulation; model validation; trajectory tracking

# 基于 Matlab 与 Carsim 的车辆运动学建模及验证分析

陈季云

南通科技职业学院, 中国 · 江苏 南通 226007

## 摘 要

车辆运动学模型因结构简单、计算负担低、鲁棒性强, 在中低速自动驾驶及算力受限的嵌入式平台中具有广泛应用价值。本文从几何约束出发推导了车辆运动学模型, 并基于Carsim/Simulink联合仿真进行验证。通过将模型输出与Carsim高精度车辆模型的仿真轨迹进行对比, 结果表明, 在低速工况下, 运动学模型输出与基准轨迹保持高度一致, 最大横向误差在可接受范围内, 验证了模型的有效性与工程实用性。

## 关键词

车辆运动学模型; 联合仿真; 模型验证; 轨迹跟踪

## 1 引言

车辆运动学模型作为描述车辆运动行为的基础工具, 在自动驾驶运动规划与控制领域具有广泛的应用价值。不同于以牛顿第二定律为核心的动力学模型, 运动学模型以几何关系为核心, 仅关注车辆位姿、速度等运动状态变量, 忽略车辆质量和相互作用力的影响。运动学模型结构简单、参数明确, 在工程应用中展现出独特优势: (1)显著降低了建模难度与计算负担, 计算效率高, 有利于满足控制算法的实时性要求; (2)动力学模型对参数误差更为敏感, 而运动学模型参数极少、对参数偏差的容忍度高, 因此运动学模型的鲁棒性通常优于动力学模型; (3)研究表明<sup>[1]</sup>, 虽然在高速工况下运动学模型的跟踪误差显著增大, 但在低速工况下依然能实现高精度跟踪, 其精度不逊于动力学模型。因此, 对于中低速行驶工况下的自动驾驶系统而言, 运动学模型能够在保证跟

踪精度的前提下, 有效降低控制器设计复杂度, 是一种兼具实用性与可靠性的建模方案。基于上述分析, 本文选择车辆运动学模型作为研究对象, 开展建模方法与仿真验证。

## 2 车辆运动学建模

车辆运动学模型如图 1 所示<sup>[2]</sup>。在惯性坐标系 OXY 下,  $(X_r, Y_r)$  和  $(X_f, Y_f)$  分别为车辆后轴和前轴轴心的坐标,  $\varphi$  为车体的横摆角 (航向角),  $\delta_f$  为前轮偏角,  $v_r$  为车辆后轴中心速度,  $v_f$  为车辆前轴中心速度,  $l$  为轴距 (变量下标 f 代表 front- 前, r 代表 rear- 后)。

图 2 所示为车辆转向过程示意图, R 为后轮转向半径, P 为车辆的瞬时转动中心, M 为车辆后轴轴心, N 为前轴轴心。此处假设转向过程中车辆质心侧偏角保持不变, 即车辆瞬时转向半径与道路曲率半径相同。

【作者简介】陈季云 (1981-), 女, 中国江苏南通人, 硕士, 从事控制理论与控制工程, 汽车技术教育教学研究。

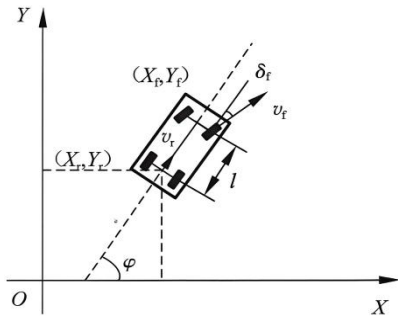


图 1 车辆运动模型

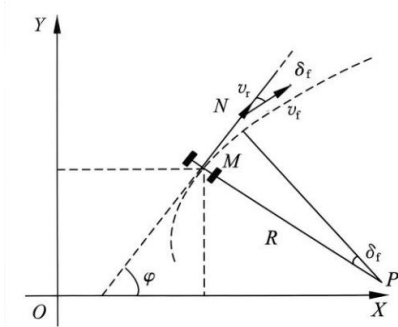


图 2 车辆前轮转向示意图

在后轴行驶轴心  $(X_r, Y_r)$  处, 速度为:

$$v_r = \dot{X}_r \cos \varphi + \dot{Y}_r \sin \varphi \quad (1)$$

前、后轴的运动学约束为:

$$\begin{cases} \dot{X}_f \sin(\varphi + \delta_f) - \dot{Y}_f \cos(\varphi + \delta_f) = 0 \\ \dot{X}_r \sin \varphi - \dot{Y}_r \cos \varphi = 0 \end{cases} \quad (2)$$

由式 (1) 和式 (2) 联合可得:

$$\begin{cases} \dot{X}_r = v_r \cos \varphi \\ \dot{Y}_r = v_r \sin \varphi \end{cases} \quad (3)$$

根据前后轮的几何关系可得:

$$\begin{cases} X_f = X_r + l \cos \varphi \\ Y_f = Y_r + l \sin \varphi \end{cases} \quad (4)$$

将式 (3) 和式 (4) 代入式 (2), 可解得横摆角速度为:

$$\omega = \frac{v_r}{l} \tan \delta_f \quad (5)$$

式中,  $\omega$  为车辆横摆角速度; 同时, 由  $\omega$  和车速  $v_r$  可得到转向半径  $R$  和前轮偏角  $\delta_f$ :

$$\begin{cases} R = v_r / \omega \\ \delta_f = \tan^{-1}(l/R) \end{cases} \quad (6)$$

由式 (3) 和式 (5) 可得到车辆运动学模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_r \\ \dot{Y}_r \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ \tan \delta_f / l \end{bmatrix} v_r \quad (7)$$

该车辆运动学模型可被进一步表示为更为一般的形式:

$$\dot{\xi}_{kin} = f_{kin}(\xi_{kin}, u_{kin}) \quad (8)$$

其中, 状态量  $\xi_{kin} = [X_r, Y_r, \varphi]^T$ , 控制量  $u_{kin} = [v_r, \delta_f]^T$ 。

### 3 车辆运动学模型验证

为了验证所建立的车辆运动学模型, 本文采用 Matlab/Simulink 与 Carsim 软件进行联合仿真。Carsim 软件是由美国 Mechanical Simulation Corporation 开发的车辆动力学仿真软件, 该软件采用参数化建模方法, 用户无需编写底层动力学方程, 只需通过图形界面输入车辆各部件的特性参数 (如悬架刚度、轮胎特性、轴距等), 软件即可自动完成数学建模与求解。由于 Carsim 基于多体动力学理论, 考虑了悬架运动学、轮胎非线性、转向系统等多自由度特性, 其仿真结果具有较高的工程精度, 因此在本文中将其输出作为验证运动学模型的基准值。

验证的基本思路是: 在 Matlab/Simulink 平台上构建车辆的运动学模型, 并在相同的前轮转角输入  $\delta_f$  和纵向车速输入  $v_r$  条件下, 将运动学模型的输出 (车辆位置  $(X_r, Y_r)$  与航向角  $\varphi$ ) 与 Carsim 高精度模型的输出进行对比分析。本文选取的车辆基本参数为: 轴距  $l=2.7\text{m}$ ; 初始状态  $[X_r, Y_r, \varphi]^T = [0, 0, 0]^T$ , 通过对比运动学模型与 Carsim 模型在相同输入下的响应差异, 可以定量评估所建立的运动学模型在特定工况下的跟踪精度与适用性。

具体操作步骤如下:

步骤一: Carsim 端参数配置

首先在 Carsim 软件中输入车辆基本参数, 必须确保与运动学模型中的参数保持一致, 其中关键参数轴距取  $L=2.7\text{m}$ , 然后在仿真工况设置中自定义仿真时长、步长、车速及转向角输入序列, 并勾选需要输出的变量, 包括车辆全局位置 Global\_X、Global\_Y 以及航向角 Yaw (即、和)。

步骤二: 生成 Simulink 接口模块

在 Carsim 端点击 “Send to Simulink” 按钮, 系统自动生成包含车辆模型的 vs\_sf 模块, 并启动 Matlab/Simulink 软件, 该模块将在 Simulink 界面中自动弹出。

步骤三: Simulink 端运动学模型搭建

在 Simulink 界面中, 基于车辆运动学微分方程搭建运动学模型, 并将其与 Carsim 生成的 vs\_sf 模块相连接, 构建了如图 3 所示的 Carsim/Simulink 联合仿真平台。

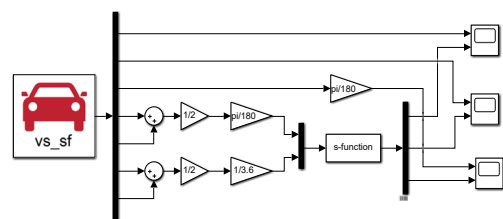


图 3 Carsim/Simulink 联合仿真平台

图中 vs-sf 模块共筛选出了 7 路信号, 从上至下依次为: 车辆位置 (全局坐标 X、Y)、航向角 (Yaw)、左右前轮转角、左右后轮速度。由于 Carsim 输出的左右前轮转角单位为度 (deg), 左右后轮速度单位为千米每小时 (km/h), 而运动学模型计算要求前轮转角单位为弧度 (rad)、纵向车速单位为米每秒 (m/s), 因此需要对上述信号进行单位换算。具体处理方法为: 将左右前轮转角相加后除以 2 求平均, 得到中心点前轮转角, 再乘以  $\pi/180$  转换为弧度; 将左右后轮速度相加后除以 2 求平均, 得到中心点纵向车速, 再除以 3.6 转换为米每秒。经过单位换算后的前轮转角与纵向车速, 同时输入至系统函数 S-Function 模块。在 S-Function 模块中, 导入描述所建运动学模型的 Matlab 脚本程序。需要特别注意的是, 脚本程序中的车辆参数 (如轴距 l、质心位置等) 必须与 Carsim 中的参数设置保持一致。该 S-Function 模块运行后, 共输出三路信号, 分别为运动学模型计算得到的车辆位置、与航向角。将这些输出信号导入示波器, 与 Carsim 直接输出的车辆位置、及航向角进行同时观测与对比, 从而验证运动学模型在不同输入工况下的跟踪精度。

步骤四: 联合仿真结果对比分析

为直观验证所建运动学模型的有效性, 将 Simulink 仿真结果导入 MATLAB, 绘制了如图 4 所示的运动学模型与 Carsim 模型输出轨迹对比图。图中, 红色实线代表 Carsim 高精度动力学模型的输出 (作为基准值), 蓝色虚线代表本文所建运动学模型的输出。

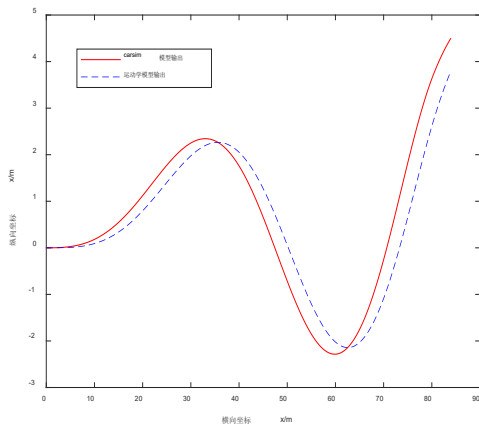


图 4 模型输出结果对比

从图 4 中可以看出, 运动学模型的输出轨迹与 Carsim 高精度模型的输出轨迹在整体走势上保持了较高的一致性。

但在部分路段, 运动学模型的输出与 Carsim 基准轨迹存在一定偏差。这主要是因为运动学模型基于纯几何关系, 忽略了轮胎侧偏等动力学特性, 在路径曲率变化较大处 (如  $x=30m$  至  $x=60m$  区间) 会产生一定的跟踪误差。经计算, 最大偏差出现在  $x=50m$  处, 约为  $0.4m$ 。尽管如此, 运动学模型整体仍表现出良好的跟随性能, 验证了所建运动学模型的有效性与工程实用性。上述验证结果为后续在中低速自动驾驶系统中应用该运动学模型提供了依据。

4 结语

本文聚焦车辆运动学模型, 在理论推导的基础上, 借助 Carsim/Simulink 联合仿真对运动学模型进行了验证。结果表明, 所建模型能够有效描述车辆在低速工况下的运动行为。在低速无人车 (如清扫车、园区物流车) 或量产 L2 级辅助驾驶系统中, 由于主控芯片算力远低于 PC 端, 必须通过模型简化来保证算法的实时性与稳定性, 因此运动学模型在此类场景中得到了广泛应用<sup>[3]</sup>。需要指出的是, 即便未来车辆主控芯片算力进一步提升, 运动学模型仍不会被完全取代。原因在于, 成熟的自动驾驶软件架构中, 规划层与控制层对模型的需求存在本质差异。虽然在控制层面, 动力学模型在高速和高精度场景下优于运动学模型, 但在规划层面, 即便在算力充足的情况下, 工程师仍倾向于使用运动学模型进行宏观路径搜索<sup>[4]</sup>。这是因为运动学模型响应快、便于并行计算、结果确定性高, 而若采用高精度动力学模型对每一条候选路径进行规划, 计算负担将呈爆炸式增长, 且收益有限。综上所述, 在未来的自动驾驶控制算法开发中, 车辆运动学模型不会因芯片算力提升而被淘汰, 更有可能与动力学模型形成“分层共存”的格局——规划层以运动学模型为主, 控制层根据场景需求灵活选用。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 龚建伟, 姜岩, 徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制 [M]. 北京理工大学出版社, 2014.
- [3] 王丽娟, 关龙新, 张明华, 等. 运用路径动态预览模型的低速智能汽车侧向跟踪控制研究 [J]. 机械科学与技术, 2024, 43(1): 141-149.
- [4] 李权, 刘璨, 赵小川. 基于分层代价地图的路径规划倾向性引入方法 [J]. 智能感知工程, 2025, 2(3): 44-51.