

自动驾驶仿真测试中车辆动力学模型参数修正方法分析

刘正昊

比亚迪汽车新技术研究院智能驾驶软件研发中心, 广东省深圳市, 518116;

摘要: 自动驾驶仿真测试对车辆动力学模型的一致性提出了严苛要求。若模型参数与实车状态偏差过大, 仿真结果就难以支撑功能安全评估。本文围绕自动驾驶仿真环境中的车辆动力学模型参数修正开展系统分析, 设计了五类具有工程可操作性的修正方法。这些方法分别针对整车标称参数的初值修正、依托实车试验响应的反向修正、围绕轮胎特性的重点修正、面向执行机构的动态补偿修正以及基于多源数据融合的闭环修正机理, 能够为构建高可信度、可维护的自动驾驶仿真车辆模型提供技术路径。

关键词: 自动驾驶仿真测试; 车辆动力学模型; 参数修正

DOI: 10.64216/3080-1508.26.02.097

引言

自动驾驶技术的演进历程可视为人类移动出行革命的缩影。自 1925 年首辆无线电遥控汽车问世以来, 该领域历经三大技术跃迁: 20 世纪末期基于规则算法的初级辅助驾驶系统, 2010 年代依托深度学习的感知决策突破, 以及当前基于车路云协同的智能驾驶体系。根据国际自动机工程师学会(SAE)分级标准, 全球量产车型已普遍实现 L2 级辅助驾驶, 头部企业正加速推进 L4 级系统商业化进程。市场研究机构 Statista 数据预计 2030 年将突破 2.2 万亿美元; 而麦肯锡则预测, 到 2030 年, 中国将成为自动驾驶的最大市场, 市场规模达到 5000 亿美元, 年复合增长率高达 40.1%。近年来, 自动驾驶开发对仿真测试的依赖程度持续提高。与实车测试相比, 仿真测试是在仿真模拟环境中配置虚拟的自动驾驶测试场景来验证自动驾驶系统的可靠性, 能够以更低的成本挖掘在实车测试中难以发现的安全关键场景。车辆动力学模型在这一过程中起到承接控制算法和测试场景的作用^[1]。

1 自动驾驶仿真测试对车辆动力学模型参数修正的现实要求

自动驾驶仿真测试并不满足于车辆模型能够运行, 更看重关键动态响应与实车保持同量级偏差。参数修正的现实要求, 核心在于把模型误差压缩到功能评价可接受范围内, 使加速、制动、转向、并线过程中的速度变化、横摆角速度、侧偏角、制动距离和轨迹偏移, 与实车测试结果在趋势、峰值和时序上尽量一致。若模型只能复现常规工况, 而在急转、急减速或附着突变时明显失真, 仿真便难以支撑自动紧急制动、车道居中控制和自动变道的有效性判断。这意味着参数修正不能停留在整车质量、轴距等静态量, 还要覆盖质心位置、转动惯量、轮胎侧偏刚度、路面附着系数, 以及转向系统、制

动系统的响应迟滞。除精度外, 模型还应满足批量场景计算效率、参数来源可追溯和版本可维护等工程要求, 否则即使局部拟合较好, 也难形成可重复、可复核的仿真测试依据。

2 车辆动力学模型的类型划分及参数构成基础

2.1 面向仿真测试的车辆动力学模型层级

面向自动驾驶仿真测试, 车辆动力学模型通常按保真度与计算负荷分层设置。单轨模型保留纵向、横向与横摆等基本运动关系, 结构紧凑, 适合控制器早期调试和大规模场景筛选, 但对左右轮受力差异、载荷转移和轮胎非线性刻画偏弱。双轨模型将前后轴左右车轮分开处理, 能够反映转向、制动和附着变化下的轮荷分配, 更适合横向控制评价。七自由度模型在车身运动基础上加入四轮转动, 能够较完整描述加减速、转向和制动耦合过程, 是当前仿真测试中较常见的工程层级。更高保真度的整车模型还会纳入悬架运动、侧倾、俯仰及执行机构动态, 适用于紧急避障、低附着路面和极限工况分析^[2]。模型层级并非越高越合适, 自动驾驶仿真更重视场景需求与计算效率之间的匹配, 能够支撑功能评价的模型, 才具有实际使用价值。

2.2 车辆动力学模型的核心参数分类

车辆动力学模型的核心参数是决定车辆响应特征的基础集合。整车参数主要包括整车质量、轴距、轮距、质心位置和转动惯量, 这些量直接影响加速、制动和横摆响应。轮胎参数处于关键位置, 侧偏刚度、纵向刚度、滑移特性和附着能力决定轮胎力生成过程, 也是轨迹偏差和稳定性边界的重要来源。转向系统参数涉及转向传动比、转向角限值、响应迟滞和执行速率, 对车道居中控制和自动变道影响明显。制动与驱动参数包括制动力建立过程、驱动扭矩输出特性、轮端转动惯量等, 关系

到跟驰、自动紧急制动和再加速工况。悬架参数则影响载荷转移、侧倾和轮胎接地状态。路面附着系数、坡度等环境参数虽然属于外部条件,但在仿真测试中同样构成模型参数体系的一部分,不能被当作固定背景量处理。

2.3 参数之间的耦合关系

车辆动力学参数之间存在明显耦合,单独修正某一项,往往难以解释整车响应变化。质心高度改变后,纵向和横向载荷转移都会发生变化,制动点头、转弯侧倾以及轮胎垂向载荷随之调整,轮胎力分配也会被重新塑造。轮胎侧偏刚度与路面附着系数并非彼此独立,附着水平下降时,横摆响应、转向不足特性和制动稳定性会同步改变。转向系统迟滞若偏大,控制指令与车身响应之间就会出现时序偏差,这种误差又会放大轨迹跟踪中的横向偏差。

3 自动驾驶仿真测试中参数偏差的主要来源

自动驾驶仿真测试中的参数偏差,往往不是单一环节失准,而是车辆实物状态、建模假设与测试数据之间持续错位的结果。许多模型初值取自整车公告参数、设计名义值或台架标定值,这类数据能够反映车辆出厂状态,却难以覆盖实测工况下的载荷变化、胎压波动、轮胎磨损和制动衰减。车辆进入测试阶段后,质心位置、轴荷分配、轮胎侧偏刚度与附着利用水平都会发生变化,若模型仍沿用静态参数,纵向减速度、横摆角速度和轨迹偏移便容易出现系统性误差。对仿真结果影响更直接的是轮胎与路面关系被过度简化^[3]。现实道路中的温度、湿滑程度、局部污染和坡度变化,都会改变轮胎力生成过程,而不少仿真环境仍采用固定附着系数和理想化轮胎参数,导致紧急制动、连续变道和弯道避障等场景下的响应明显失真。

偏差还会出现在数据链条和执行链条。实车采集阶段若存在时间同步误差、坐标系转换不严谨、传感器噪声偏大或采样频率不足,参数修正就会建立在不稳定的数据基础之上,模型即使完成拟合,也未必具备真实解释力。另一类常见来源,是转向系统、制动系统和驱动系统的动态特性被简化处理。执行迟滞、死区、限幅和建立过程一旦描述不足,控制指令与车辆响应之间便会形成额外偏差。自动驾驶车辆还存在控制器补偿效应,上层控制策略会主动修正部分动态偏差,这容易掩盖底层参数问题,让模型误差与控制误差相互混杂。

4 自动驾驶仿真测试中车辆动力学模型参数修正方法

4.1 基于整车标称参数的初值修正

基于整车标称参数的初值修正,关键在于把设计状

态转换为仿真测试所对应的实际状态,而非直接照录公告值或样本车参数。修正起点通常放在整车质量、前后轴荷、轴距、轮距、质心纵向位置、质心高度和横摆转动惯量。整备质量可作为基准,但仿真测试多在载荷可变条件下进行,车上测试设备、人员、供电单元和数据采集系统都会改变轴荷分配,因此需要按测试车实际称重结果重算前后轴静载。质心纵向位置可依据轴荷反推,质心高度宜结合制动俯仰或稳态转弯载荷转移结果校正^[4]。横摆转动惯量若缺少试验值,可根据整车布置、总质量和轴距进行工程估算,再用低速转向与双移线响应细调。轮胎有效滚动半径、转向传动比、制动力分配系数也应与实车配置逐项核对,避免车型配置差异把初值带偏。完成静态参数换算后,还需用匀速直线、恒转角圆周和中等减速度制动工况做一次快速筛查,观察速度、横摆角速度和制动距离是否落入合理区间,同时决定后续修正深度。这样建立的初值更接近测试车本体状态,后续标定过程会明显收敛,参数漂移范围也更易控制。

4.2 基于实车试验响应的反向修正

基于实车试验响应的反向修正,重点在于将可观测动态响应拆解为可识别参数,再按灵敏度顺序逐步回推。数据准备阶段要先完成时间同步、坐标统一和异常点剔除,方向盘转角、车速、横向加速度、纵向加速度、横摆角速度、四轮轮速和制动主缸压力至少应保持同一采样基准。工况选择不能杂乱堆叠,稳态圆周更适合识别转向梯度和轮胎侧偏刚度,双移线有助于暴露横摆相位偏差,直线制动能够校正制动力建立速度与附着利用水平。反向修正时,不宜把全部参数一次性投入优化,否则多个参数会相互补偿,结果看似贴合,物理意义却失真。较稳妥的做法是先锁定整车质量、轴荷和几何尺寸,再修正质心位置与横摆转动惯量,随后处理轮胎参数,最后补偿执行机构动态。目标函数也不应只盯住单一轨迹误差,横摆角速度峰值、响应延迟、侧向加速度相位差和制动距离都要进入判据。每轮迭代后都应回到未参与修正的验证工况交叉核验,若同一组参数仅在一个动作中贴合良好,说明修正已陷入局部适配,需要回退重估。

4.3 基于轮胎特性重构的重点修正

基于轮胎特性重构的重点修正,实质是重建轮胎力与滑移率、侧偏角、垂向载荷及附着条件之间的对应关系。自动驾驶仿真中大量偏差最终都会落到轮胎环节,尤其在制动转向叠加、低附着变道和连续弯道中更为明显。修正时不能只给出一个经验附着系数,而要分别处

理纵向力、侧向力和联合工况下的力分配。稳态圆周试验可用于提取侧偏刚度变化趋势,蛇形绕桩和双移线能够识别高侧偏角区间的非线性特征,直线制动与不同踏板开度减速工况可校正滑移率对应的纵向力峰值位置。若试验条件允许,还应记录轮胎温度和胎压,否则同一车型在不同测试时段的轮胎特性会出现明显分散。重构过程中需要把垂向载荷敏感性纳入模型,前后轴载荷变化会直接改变可用侧向力,若仍沿用常值刚度,仿真车辆在急转入弯时往往过于灵敏或转向不足^[5]。轮胎参数更新后,必须联动检查制动距离、横摆响应和轨迹稳定性,只有三个层面同时改善,才能够说明轮胎特性重构真正落到实处。

4.4 基于执行机构动态补偿的修正

基于执行机构动态补偿的修正,处理对象主要是转向系统、制动系统和驱动系统的响应迟滞、死区、限幅与建立过程。自动驾驶仿真里常见的问题,是控制器输出指令已到位,而模型车辆响应过快或过慢,造成轨迹误差被误判为控制策略缺陷。转向系统修正应从方向盘转角到前轮转角的传递链入手,校正转向传动比、执行延迟、角速度上限和回正过程;若车辆采用线控转向或电动助力转向,还要纳入低速与高速区间的不同增益。制动系统更需要描述压力建立斜率、制动初段空行程以及减压释放速度,自动紧急制动工况对这一部分极为敏感,几十毫秒的差异就会反映到制动距离和姿态变化上。驱动系统则要考虑扭矩指令到轮端输出之间的响应滞后、扭矩限值和再加速阶段的爬升过程,纯电平台在这方面尤为突出。补偿参数设定后,不能只看单次输入输出对齐,还应检查连续控制下的累积误差,例如弯道居中时的方向修正频率、跟驰减速后的再加速平顺性,只有动态链条与实车接近,仿真测试中的控制评价才有可靠基础。

4.5 基于多源数据融合的闭环修正

基于多源数据融合的闭环修正,目的在于打通设计参数、台架数据、实车试验和仿真残差之间的链路,让参数更新具备可追溯性和场景适配能力。工程实施时,可先以整车设计数据建立基线模型,再把悬架刚度、转向系统响应、制动压力建立特性等台架结果写入对应子模型,随后引入道路试验数据校正关键动态参数^[6]。多源融合不能简单叠加资料,而要先确定数据可信等级。设计值适合作为边界约束,台架数据适合限定部件特性,

实车数据负责修正整车级动态偏差。场景组织也需分层,常规跟驰、车道保持、紧急制动、双移线和低附着避障应分别建立误差档案,记录速度、横摆角速度、侧向加速度、制动距离和轨迹偏差的残差分布。每轮修正完成后,将新参数放回全部场景复算,若某一类工况改善而另一类工况明显恶化,说明参数更新破坏了整体平衡,需要回到上一版继续拆分问题来源。闭环修正真正有价值的地方,在于它能够形成参数版本管理机制,明确每个参数的来源、更新时间、适用车型和有效工况,使仿真模型从一次性标定对象转变为可持续维护的测试基础。

5 结语

全文围绕自动驾驶仿真测试中的车辆动力学模型参数修正展开讨论,构建了由整车标称参数初值修正、实车试验响应反向修正、轮胎特性重构重点修正、执行机构动态补偿修正和多源数据融合闭环修正构成的方法体系,给出了面向称重、试验场工况选择、数据对齐和执行机构建模的具体实施思路。上述内容把参数修正工作从零散经验提升为可规划的工程流程。后续研究可在这一框架上引入在线健康监测和场景感知的参数更新机制,将实车运行数据持续反馈到仿真模型,为自动驾驶安全验证和长期运行评估提供更坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 吴建平,李冠洲,赵帅,黄玲.自动驾驶仿真测试技术驱动汽车产业智能跃迁[J].《系统仿真学报》,2025,37(07):1649-1664
- [2] 杨志胜.自动驾驶仿真测试关键场景生成方法研究与应用[D].上海第二工业大学,2025.
- [3] 刘尧,赵俊丽.整合车辆运动学的动力学模型构建研究[J].专用汽车,2025,(07):31-32+47.
- [4] 王德军,彭程,李英,等.集成参数辨识的车辆动力学自适应模型预测控制[J/OL].吉林大学学报(工学版),1-10[2026-03-06].
- [5] 吴建平,李冠洲,赵帅,等.自动驾驶仿真测试技术驱动汽车产业智能跃迁[J].系统仿真学报,2025,37(07):1649-1664.
- [6] 周新建,罗建新.跨座式单轨车辆动力学仿真分析及悬挂参数多目标优化[J].机械设计,2026,43(01):157-166.