

在交叉施工中,可采用桁架结构对既有管道进行保护。如某工程中,并列设置两道吊带从管道下方穿过兜裹管道,吊带连接在桁架的手动葫芦上,通过葫芦的松紧来抵消地面沉降对管道的影响。同时,采用光纤光栅对管道本体进行应力应变监测,确保施工安全。

6 支吊架设计与结构条件

6.1 支吊架的类型选择

界外管道的支吊架根据功能可分为承重架、限位架和导向架等类型。根据结构形式可分为独立式支架、龙门架、悬臂架及弹簧吊架等。支吊架的选择需考虑管道的布置、荷载条件及热位移方向等因素。

对于温度较高的管道,应在适当位置设置导向架和限位架,引导热膨胀方向,避免过大的横向位移。对于存在垂直热位移的管道,应考虑采用弹簧支吊架,防止管道脱空或过载。

6.2 荷载计算与结构提资

界外管道专业需向结构专业提交准确的荷载条件,包括:

垂直荷载:包括管道自重、介质重量、保温层重量、水压试验时的充水重量等。对于架空管道,还需考虑操作平台上的活荷载。

水平荷载:包括管道热膨胀产生的推力、风荷载、地震荷载及介质脉动产生的振动荷载等。固定架承受的水平推力需经应力分析确定。

特殊荷载:包括清管荷载、泄放反力、水击荷载等。

结构提资时,应明确各种荷载的工况组合、作用点位置及荷载方向。对于高温管道,应说明管道的操作温度、安装温度及位移量,便于结构专业考虑位移对荷载的影响。

7 全生命周期设计理念

7.1 施工可实施性

界外管道设计应充分考虑施工的可实施性。具体包括:合理设置分段试压的临时隔离点;考虑吊装设备的作业空间和起吊能力;对于穿越段,预留足够的操作场地和施工通道;合理安排施工工期,避免恶劣天气条件下的关键作业。

7.2 运营可维护性

从运营维护角度出发,界外管道设计应考虑:在适当位置设置清管设施和收发球筒;高点设排气阀,低点设排液阀;长距离管道设置线路截断阀;在道路穿越处、河流穿越处及重要构筑物附近设置标志桩;设置必要的在线监测系统,对关键管道的应力、腐蚀情况进行实时监测。

7.3 风险可防控性

界外管道往往穿越人员活动区域或环境敏感区域,风险防控尤为重要。采用故障树分析法(FTA)对埋地界外管道进行风险评价,可以识别主要风险因素并采取针对性预防措施。设计阶段应考虑的主要风险包括:第三方施工破坏、腐蚀减薄、自然灾害及操作失误等。

对于高风险管段,可采取增加壁厚、提高防腐等级、设

置保护结构、安装监测系统等主动防护措施。同时,应与管道沿线相关单位建立联防机制,实现项目全生命周期管理。

8 工程实践案例

以某化工园区公共管廊项目为例,该园区需新建一条连接多套装置的界外管道系统,全长约3.5公里,包含蒸汽管道(260℃、1.6MPa)、工艺物料管道及公用工程管道。

路由规划:管廊沿园区主干道布置,充分利用道路两侧的狭长地带,减少征地拆迁。穿越园区主入口道路时采用桁架跨越方式,净空高度6.0米。

补偿设计:蒸汽管道温度高、管径大(DN400),应力分析显示自然补偿不足,在管廊中部设置两组方形补偿器,同时在两端设置固定架,中部设置导向架引导热膨胀方向。

穿越设计:管道需穿越一条规划河道,经与水利部门协调,采用顶管方式敷设,外套钢筋混凝土保护涵,穿越段管道采用加强级防腐并设置检漏管。

监测系统:在穿越段、重要道路两侧及管廊两端设置应力监测点和腐蚀监测探头,数据接入园区控制中心,实现实时监控。

该项目投运三年来,管道运行平稳,监测系统记录的数据为后续维护提供了重要依据。

9 结语

界外管道设计是一项系统性工程,需要综合考虑工艺要求、地质条件、经济指标与安全规范等多重约束。本文从管廊规划、管道布置、补偿设计、应力分析、特殊地段穿越及支吊架设计等方面,系统阐述了界外管道的设计要点。在此基础上,提出了全生命周期设计理念,强调在设计阶段充分考虑施工可实施性、运营可维护性及风险可防控性。

随着化工园区集约化、智能化发展,界外管道设计面临新的挑战:管廊负荷日益增大,空间资源日趋紧张;环境敏感区域的管道保护要求不断提高;数字化交付和智能运维对设计提出新的要求。建议在今后的设计实践中,进一步研究管廊空间的立体化利用技术,完善基于风险的管道设计方法,推动界外管道设计向标准化、模块化、智能化方向发展。

参考文献

- [1] 化工项目厂区外管的设计浅析[J]. 浙江化工, 2017(05).
- [2] 周小超,董旭,王亚飞等. 大型河渠采取倒虹吸方式穿越油气管道案例[J]. 管道保护, 2024(3).
- [3] Yang Peng, An Yongfu, Chen Yang. Risk evaluation and preventive measure of buried outer pipelines in transfer station: A case study of AZ1 transfer station, area S, northwestern China[J]. PETROLEUM GEOLOGY & EXPERIMENT, 2016, 38(S1): 153-159.
- [4] 界外管道设计浅析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2016(09).
- [5] Jörg Himmerich, Albert Großmann, Michael Lubberger, et al. Crossing of the river Amu Darya along 1,800 metres with a 56" high-pressure gas pipeline using the HDD method[C]. Pipeline Technology Conference, 2011.

Research on Vehicle Drift Control Method Based on Python Interface of Carsim

Mai Yao

Chery Commercial Vehicle (Anhui) Co., Ltd., Wuhu, Anhui, 241000, China

Abstract

Aiming at the problems of insufficient flexibility of traditional vehicle extreme condition simulation platforms and low efficiency of control algorithm development, this paper proposes a vehicle drift control method based on the joint interface of Carsim and Python. By building a Carsim-Python real-time data interaction platform, combined with the dynamic characteristics of vehicle extreme motion, a hierarchical control strategy including drift initiation, steady-state maintenance and exit recovery is designed. The sliding mode control algorithm is implemented in Python and co-simulated with the high-precision vehicle model in Carsim. The experimental results show that this method can realize stable and controllable vehicle drift motion, with the steady-state error of the side-slip angle of the center of mass being less than 5%. The drift exit process is smooth without instability. At the same time, it has the advantages of simple development, efficient debugging and strong expandability, which can provide effective technical support for the research on vehicle extreme handling, active safety control and extreme working conditions of automatic driving.

Keywords

Carsim; Python interface; vehicle dynamics; vehicle drift; sliding mode control; co-simulation

基于 Carsim 的 Python 接口汽车漂移控制方法研究

姚励

奇瑞商用车（安徽）有限公司，中国·安徽 芜湖 241000

摘要

针对传统车辆极限工况仿真平台灵活性不足、控制算法开发效率低等问题，本文提出一种基于 Carsim 与 Python 联合接口的汽车漂移控制方法。通过搭建 CarsimPython 实时数据交互平台，结合车辆极限运动动力学特性，设计包含漂移启动、稳态维持与退出恢复的分层式控制策略，利用 Python 实现滑模控制算法并与 Carsim 高精度车辆模型进行联合仿真。实验结果表明，该方法能够实现稳定可控的汽车漂移运动，质心侧偏角稳态误差小于 5%，漂移退出过程平顺无失稳，同时具备开发简洁、调试高效、扩展性强等优势，可为车辆极限操控、主动安全控制及自动驾驶极限工况研究提供有效技术支撑。

关键词

Carsim; Python接口; 车辆动力学; 汽车漂移; 滑模控制; 联合仿真

1 引言

随着智能汽车与车辆动力学控制技术不断发展，车辆在极限工况下的运动控制逐渐成为研究热点。汽车漂移作为典型的极限操控工况，表现为后轮持续突破路面附着极限产生大侧偏角运动，同时通过转向、驱动与制动力协同使车辆保持稳定可控的侧滑状态。漂移控制不仅在赛车运动中具有重要价值，在低附着路面行驶、突发侧滑稳定控制、极限避障等场景中同样具备重要工程意义。实现可靠、稳定的漂移控制，需要高精度车辆动力学模型与高效灵活的控制算法相结合。

目前，车辆动力学仿真领域广泛使用 Carsim 作为高精度仿真平台，其内置多体动力学模型、轮胎模型、路面模型

能够真实复现车辆极限运动特性。但 Carsim 自带控制模块灵活性有限，复杂算法开发较为困难。Python 作为开源、高效的编程语言，具备丰富的科学计算库与控制算法库，非常适合实现复杂控制逻辑。通过构建 Carsim 与 Python 的联合接口，可将高精度仿真环境与灵活的算法开发环境结合，为漂移控制研究提供理想平台。

本文主要内容包括：搭建 CarsimPython 数据交互接口，分析漂移动力学特性，设计分层式漂移控制策略，通过联合仿真验证控制效果，并对结果进行系统分析。

2 CarsimPython 联合仿真平台搭建

2.1 平台总体架构

CarsimPython 联合仿真平台由 Carsim 车辆动力学仿真内核、Python 控制算法模块以及数据交互接口三部分组成。Carsim 负责车辆、轮胎、路面、动力传动系统的高精度建

【作者简介】姚励（1983-），中国安徽安庆人，硕士。

模与动力学求解；Python 负责实现漂移控制算法、状态监测、决策逻辑与数据处理；接口模块实现两者之间实时变量传递，包括前轮转角、驱动扭矩、质心侧偏角、横摆角速度、车速等关键信号。

该架构优势在于：

- 保留 Carsim 动力学仿真精度，保证极限工况可信度；
- 利用 Python 快速实现复杂控制算法，缩短开发周期；
- 支持自定义工况、参数遍历与批量仿真，提升研究效率。

2.2 Python 与 Carsim 接口实现方式

Carsim 提供 DLL 动态链接库与 VSConnect 通信协议，支持外部程序调用。本文采用 ctypes 调用 Carsim DLL 的方式实现 Python 接口，具有部署简单、实时性高、稳定性强的特点。

接口实现步骤如下：

环境配置：安装 Carsim 2020 及以上版本、Python 3.8 及以上版本，配置系统环境变量；

依赖库安装：使用 pip 安装 numpy、scipy、ctypes 等库；
加载动态链接库：通过 ctypes.CDLL 加载 vsdll.dll，实现对 Carsim 内核函数调用；

变量定义：在 Carsim 中设置输入输出变量，包括转向角、车轮扭矩、车速、质心侧偏角、横摆角速度等；

仿真流程控制：Python 完成初始化、参数写入、单步仿真、状态读取、循环迭代与仿真结束。

通过该接口，Python 可在每个仿真步长内读取车辆状态，计算控制量并回传至 Carsim，实现闭环实时控制。

2.3 联合仿真工作流程

联合仿真采用闭环控制结构，流程如下：

Python 加载 Carsim 模型文件，完成仿真环境初始化；
设置仿真步长、总时间、路面附着系数、初始车速等参数；

进入仿真循环，Python 读取 Carsim 输出状态量；

依据漂移控制算法计算前轮转角与后轮驱动扭矩；

将控制量写入 Carsim 并执行一步仿真；

循环执行直至仿真结束，导出并分析数据。

该流程保证控制算法与车辆模型同步运行，实现漂移全过程动态控制。

3 汽车漂移动力学特性分析

3.1 漂移基本机理

汽车漂移的本质是后轮侧向力进入饱和区，产生持续侧滑，同时通过前轮转向与动力调节使车辆保持动态平衡。漂移过程可分为三个典型阶段：

漂移启动：通过增大后轮扭矩或施加制动力使后轮滑移率快速上升，突破附着极限，形成初始侧偏角；

稳态漂移：质心侧偏角与横摆角速度维持在稳定区间，车辆沿近似圆弧轨迹做可控侧滑运动；

漂移退出：逐步减小后轮扭矩并反向修正转向，使后

轮侧滑逐渐收敛，车辆恢复正常行驶。

漂移具有强非线性、轮胎力饱和、状态耦合紧密等特点，对控制鲁棒性要求极高。

3.2 车辆二自由度动力学模型

为便于控制器设计，建立车辆二自由度动力学模型，忽略悬架、转向系统动态特性，表达式为：

$$\begin{cases} m(\dot{v}_x - v_y \omega_r) = F_{xf} + F_{xr} - m(v_y \dot{\omega}_r + v_x \omega_r) \\ = F_{yf} + F_{yr} - I_z \dot{\omega}_r \\ \dot{r} = a F_{yf} - b F_{yr} \end{cases}$$

式中：m 为整车质量，v_x、v_y 为纵向与横向车速，ω_r 为横摆角速度；I_z 为车辆绕 z 轴转动惯量，a、b 为质心到前后轴距离；F_{xf}、F_{xr} 为前后轮纵向力，F_{yf}、F_{yr} 为前后轮侧向力。

3.3 轮胎非线性模型

漂移工况下轮胎处于强非线性饱和区，线性轮胎模型不再适用。本文采用 Fiala 轮胎模型描述侧向力与纵向力特性：

$$\begin{cases} F_y = -C_\alpha \tan \alpha + 3\mu F_z C_\alpha^2 |\tan \alpha| - 27\mu^2 F_z^2 C_\alpha^3 \tan^3 \alpha \\ F_x = \mu F_z s^2 + \tan^2 \alpha s \end{cases}$$

式中：C_α 为轮胎侧偏刚度，μ 为路面附着系数，F_z 为垂直载荷，s 为滑移率，α 为侧偏角。

该模型能够准确反映轮胎力在大侧偏角下的饱和特性，为漂移控制提供理论基础。

3.4 漂移工况动力学特征

通过 Carsim 仿真分析可得：

漂移启动阶段质心侧偏角可在 0.5s 内由 0° 上升至 25° 左右；

稳态漂移时后轮滑移率通常大于 0.8，侧向力基本饱和；
横摆角速度与质心侧偏角呈现强耦合关系，微小扰动易导致失稳；

退出过程需平缓控制，避免突变造成甩尾或打转。

上述特性决定漂移控制器必须具备快速响应、强鲁棒性与平滑输出能力。

4 分层式漂移控制算法设计

4.1 控制策略总体框架

本文设计分层漂移控制系统，分为上层决策层与底层控制层：

上层决策层：根据仿真时间与车辆状态判断漂移阶段，输出期望质心侧偏角与横摆角速度；

底层控制层：采用滑模控制算法跟踪期望状态，计算前轮转角与后轮扭矩。

分层结构使系统逻辑清晰、调试方便，适合漂移全过程控制。

4.2 漂移启动阶段控制

启动目标：在短时间内使后轮突破附着极限，建立稳定初始侧偏角。控制策略：

前 0.5s 内将后轮扭矩提升至峰值扭矩的 90% 左右；

施加适度前轮转角辅助建立侧滑；

当质心侧偏角达到设定阈值后自动切换至稳态维持阶段。

该方式启动迅速、过程可控，适合后轮驱动车辆动力起漂。

4.3 稳态漂移滑模控制

稳态控制目标是跟踪期望质心侧偏角与横摆角速度。滑模控制对非线性系统具有强鲁棒性，适合漂移控制。

定义滑模面： $s=k_1(\beta-\beta_d)+k_2(\omega_r-\omega_{rd})$

基于指数趋近律设计控制律： $\delta=\delta_0+k_{ssgn}(s)+\eta sTr=Tr_0+k_{tsgn}(s)$

式中： β_d 、 ω_{rd} 为期望质心侧偏角与横摆角速度， δ 为前轮转角， Tr 为后轮扭矩。控制器通过调节转向与扭矩使系统状态沿滑模面收敛，实现稳定漂移。

4.4 漂移退出阶段控制

退出阶段采用渐进收敛策略：

期望质心侧偏角随时间线性递减；

逐步降低后轮驱动扭矩；

适当施加反向前轮转角抑制横摆角速度突变；

保证侧偏角平滑收敛至 0° ，避免失稳。

该策略可实现平稳、安全的漂移退出。

4.5 Python 控制算法实现

在 Python 中完成控制器编写，核心流程包括：

加载并初始化 Carsim 接口；

循环读取车辆状态；

根据阶段执行不同控制逻辑；

实时输出转向角与扭矩指令；

仿真结束后释放资源。

代码结构简洁，易于修改与扩展，可快速调试控制增益与阶段参数。

5 仿真实验与结果分析

5.1 仿真参数设置

仿真平台：Carsim 2020.1 + Python 3.8 车辆类型：后轮驱动轿车整车质量：1500kg 轴距：2.7m 路面：干燥沥青，附着系数 $\mu=0.8$ 初始车速：80km/h 仿真步长：0.01s 总仿真时间：10s 控制阶段：00.5s 启动，0.58s 稳态，810s 退出

5.2 结果分析

5.2.1 漂移启动阶段

00.5s 内，后轮扭矩大幅提升，后轮滑移率迅速上升至饱和区，质心侧偏角由 0° 快速上升至 25° 左右，横摆角速度同步上升至目标值，启动过程迅速且无剧烈振荡。

5.2.2 稳态漂移阶段

0.58s 期间，质心侧偏角稳定在 $25^\circ \pm 1^\circ$ ，横摆角速度保持在设定区间，控制误差小于 5%。前轮转角与后轮扭矩在小范围内动态调节以抵消非线性扰动，车辆呈现稳定、持续的可控漂移运动。

5.2.3 漂移退出阶段

810s 期间，期望质心侧偏角线性下降，实际侧偏角平稳跟踪，无超调与失稳现象。横摆角速度逐渐收敛至 0，后轮扭矩逐步降低，车辆平稳恢复至直线行驶状态，退出过程安全平顺。

5.3 方法优势总结

与传统 MATLAB/Simulink 方案相比，本文方法具有以下优势：

Python 开发效率更高，代码简洁易维护；

Carsim 模型精度高，极限工况更接近真实车辆；

接口灵活，便于扩展强化学习、模型预测控制等先进算法；

数据处理与可视化便捷，适合批量仿真与分析。

实验结果证明，基于 CarsimPython 接口的漂移控制方法可行、有效，具备较高工程应用价值。

6 结论与展望

6.1 结论

本文提出并实现了一种基于 Carsim 的 Python 接口汽车漂移控制方法，主要成果如下：

成功搭建 CarsimPython 实时联合仿真平台，实现控制算法与高精度动力学模型闭环交互；

建立漂移动力学模型与轮胎非线性模型，揭示极限工况下车辆运动机理；

设计包含启动、稳态维持、退出的分层漂移控制策略，采用滑模控制保证系统鲁棒性；

仿真实验验证该方法可实现稳定可控漂移，稳态误差小，退出过程平顺。

该方法为车辆极限运动控制、主动安全系统开发及自动驾驶极限工况研究提供了高效可行的技术途径。

6.2 展望

未来可在以下方向进一步深化研究：

引入模型预测控制 (MPC) 与强化学习，提升复杂轨迹漂移跟踪能力；

拓展低附着路面、变曲率赛道等多工况漂移控制，提高泛化性；

结合硬件在环 (HIL) 或实车平台进行验证，提升工程实用性；

优化 Python 接口通信效率，实现分布式仿真与多场景并行计算。

参考文献

- [1] 侯晓文，张景景，何承坤。基于残差强化学习的极限工况自动驾驶控制 [J]. 工程信息学进展，2022.
- [2] 李大鹏，张军，林树森。基于漂移的紧急避障策略规划与控制 [J]. 控制工程实践，2023.
- [3] 智能网联电动汽车创新中心。极端条件下人车共享漂移控制研究 [J]. 汽车工程学报，2025.