

密 级：公开

学 号: 2220120101



Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 线控转向路感模拟电机 控制策略研究

论 文 作 者	方震宇
指 导 教 师	肖平（教授）
学 科（专业）	机械工程
研 究 方 向	车辆工程

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号: U463.4

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220120101

线控转向路感模拟电机控制策略研究

Research on Control Strategy of Steer-by-wire Road Sensing Simulation Motor

学 生 姓 名: _____ 方震宇

指 导 教 师: _____ 肖平 (教授)

学 科 (专业): _____ 机械工程

研 究 方 向: _____ 车辆工程

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：



日期： 2025 年 5 月 20 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

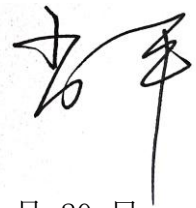
不保密 ☒。

学位论文作者签名：



日期：2025 年 5 月 20 日

指导教师签名：



日期：2025 年 5 月 20 日

线控转向路感电机控制策略研究

摘 要

与传统机械转向系统相比，线控转向系统以其灵活性和控制精度优势，广泛应用于智能网联汽车和自动驾驶领域。然而，在复杂路况下现有系统的路感反馈机制鲁棒性不足，影响驾驶体验。为此，本文基于车辆动力学建立线控转向模型，利用群智能算法对模型中转向增益进行迭代优化。在基于车轮回正力矩和重力回正力矩搭建的路感力矩计算模型框架下，结合 Carsim 软件、魔术轮胎公式和无迹卡尔曼滤波进行力矩修正。设计了 SMC-LQR 与矢量控制相结合的路感电机上下层控制策略，以保证路感力矩的输出精度。最后在仿真、台架和实车上完成了算法和策略验证。

具体研究内容如下：

(1) 本文通过分析线控转向系统的基本原理和物理结构，同时以车辆操控稳定性指标为依据，引入群智能算法对转向增益进行优化，进而构建了完整的线控转向动力学模型，为路感反馈系统研究提供了理论支撑。

(2) 本文利用改进后的混沌映射强化了群智能算法初始化群体的非线性、抗干扰性和普适性，提升全局搜索能力。改进黄金正弦策略，在趋近最优解的基础上增加远离最差解的机制，加速收敛。引入惩罚函数，避免边界干扰，进一步提高收敛速度和精度。

(3) 本文在基于车轮回正力矩和重力回正力矩的路感力矩计算模型框架上，提出利用方向盘摩擦力矩经验公式进行修正。除此之外，为充分利用线控转向系统机械解耦的优势，设计了基于无迹卡尔曼滤波的优化策略，在保证力矩计算真实性的同时，进一步提升模拟精度。

(4) 为保证路感电机可以将接收到的来自转向控制器 ECU 的信号正确精准地表达给驾驶员，本文设计了新颖的 SMC-LQR 融合控制策略，实时监控电机实际输出与理想输出的误差并动态调整输入。同时，采用基于矢量控制的路感电机控制策略，精确调节转矩和转速输出，完成上下层协同控制，提升路感力矩输出精度，优化驾驶员体验。

(5) 为验证前文理论模型及优化方案，本文通过搭建 Carsim、Prescan 和 Matlab 联合仿真平台测试 SMC-LQR 控制策略的效果，利用完全机械解耦的线控转向台架，在 Veristand 平台上验证路感力矩计算模型及控制策略，最后在线控实车底盘上进行室内理想环境和实际道路环境测试。

本次研究为提升线控转向系统路感反馈的精度与鲁棒性提供了理论依据和技术支持，推动了智能网联汽车和自动驾驶技术的发展。

关键词：线控转向，路感反馈，蜣螂优化算法，滑模控制，仿真测试

Research on Control Strategy of Steer-by-wire Road Sensing Simulation Motor

ABSTRACT

Compared with traditional mechanical steering systems, steer-by-wire systems have gained widespread application in intelligent connected vehicles and autonomous driving fields due to their superior flexibility and control accuracy. However, under complex road conditions, the robustness of the existing system's road feel feedback mechanism is insufficient, which negatively impacts the driving experience. To address this issue, this paper establishes a steer-by-wire model based on vehicle dynamics and iteratively optimizes the steering gain using swarm intelligence algorithms. Within the framework of the road sensing torque calculation model, which integrates wheel alignment torque and gravity alignment torque, torque correction is performed by combining Carsim software, the Magic tire formula, and an unscented Kalman filter. A control strategy that combines SMC-LQR and vector control for the upper and lower layers of the road induction motor is designed to ensure the output accuracy of the road induction torque. Finally, the algorithm and strategy are verified through simulation, bench testing, and real-vehicle experiments.

The specific research contents are as follows:

(1) This paper analyzes the basic principle and physical structure of the steer-by-wire system. Based on the vehicle handling stability index, the swarm intelligence algorithm is introduced to optimize the steering gain, thereby constructing a complete steer-by-wire dynamics model. This provides theoretical support for the study of the road sensing feedback system.

(2) The improved chaotic mapping method is employed to enhance the nonlinearity, anti-interference capability, and universality of the swarm intelligence algorithm during population initialization, improving its global search ability. Additionally, the golden sine strategy is refined by incorporating a mechanism to move away from the worst solution while approaching the optimal solution, accelerating convergence. A penalty function is introduced to avoid boundary interference, further enhancing convergence speed and accuracy.

(3) Based on the framework of the road sensing torque calculation model, which incorporates wheel alignment torque and gravity alignment torque, this paper proposes correcting it using the empirical formula of the steering wheel friction torque. Furthermore, to fully leverage the mechanical decoupling advantage of the steer-by-wire system, an optimization strategy based on unscented Kalman filtering is designed.

This ensures the authenticity of torque calculations while improving simulation accuracy.

(4) To ensure that the road sensing motor accurately conveys signals received from the steering controller ECU to the driver, this paper designs a novel SMC-LQR fusion control strategy. This strategy monitors the error between the actual and ideal outputs of the motor in real time and dynamically adjusts the input. Meanwhile, a road sensing motor control strategy based on vector control is adopted to precisely adjust torque and speed outputs, achieving collaborative control of the upper and lower layers, improving the output accuracy of the road sensing torque, and optimizing the driver experience.

(5) To verify the theoretical model and optimization scheme discussed earlier, this paper tests the effectiveness of the SMC-LQR control strategy by constructing a joint simulation platform using Carsim, Prescan, and Matlab. Using a fully mechanically decoupled steer-by-wire steering bench, the road induction torque calculation model and control strategy are validated on the Veristand platform. Finally, indoor ideal environment and actual road environment tests are conducted on an online-controlled real-vehicle chassis.

This research provides a theoretical basis and technical support for enhancing the accuracy and robustness of the road sensing feedback of the

steer-by-wire system, promoting the development of intelligent connected vehicles and autonomous driving technologies. .

KEY WORDS: Steer-by-wire steering, road sensing feedback, Dung beetle optimization algorithm, sliding mode control, Simulation test

目录

摘 要.....	I
ABSTRACT	III
目录.....	VII
插图清单.....	X
插表清单.....	XII
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题背景及研究意义.....	1
1.2 线控转向系统国内外研究现状.....	4
1.3 路感模拟技术国内外研究现状.....	7
1.3.1 路感系统数学框架研究现状.....	7
1.3.2 路感系统优化策略研究现状.....	8
1.4 研究内容.....	9
第 2 章 线控转向系统的建模和仿真.....	11
2.1 线控转向系统结构及工作原理.....	11
2.1.1 线控转向系统结构.....	11
2.1.2 线控转向系统原理.....	12
2.2 线控转向控制系统动力学模型建立.....	13
2.2.1 方向盘总成建模.....	13
2.2.2 转向总成建模.....	14
2.3 变传动比设计.....	15
2.3.1 变传动比模型.....	16
2.3.2 操控稳定性评价指标.....	17
2.3.3 基于蜣螂算法优化操控性稳定指标的转向增益.....	20
2.4 总结.....	29
第 3 章 路感模拟系统的建模和优化.....	30
3.1 路感力矩理论数学模型.....	30

3.2 基于 Carsim 和魔术轮胎公式的优化策略	33
3.3 基于无迹卡尔曼滤波的路感优化策略	36
3.3.1 状态空间模型	36
3.3.2 过程模型	37
3.3.3 无迹卡尔曼滤波	38
3.3.4 基于群智能算法的无迹卡尔曼滤波优化	40
3.4 总结	41
第 4 章 路感电机控制策略研究	42
4.1 基于方向盘动力学模型的 SMC 策略	42
4.2 基于方向盘动力学模型的 LQR 策略	43
4.3 基于 SMC 和 LQR 的融合控制策略	46
4.3.1 SMC-LQR 融合策略设计	46
4.3.2 SMC-LQR 融合策略稳定性检验	48
4.4 基于矢量控制的路感电机控制策略	48
4.4.1 电机和负载模型	49
4.4.2 矢量控制	49
4.4.3 基于群智能算法的 PI 参数优化	50
4.5 总结	51
第 5 章 联合仿真与实车实验	53
5.1 虚拟联合仿真软件介绍	53
5.2 虚拟联合仿真实验	55
5.2.1 可变传动比计算实验	56
5.2.2 SMC-LQR 融合控制策略对比试验	57
5.3 台架实验	58
5.4 实车实验	60
5.5 总结	63
第 6 章 总结与展望	64
6.1 全文总结	64

6.2 工作展望.....	65
参考文献.....	66
攻读硕士学位期间发表学术论文及参研项目	73
致谢.....	74

插图清单

图 1-1 2020-2025（预测）智能网联汽车销量	1
图 1-2 电动助力转向结构图	2
图 1-3 线控转向结构图（蔚来）	3
图 1-4 搭载 DAS 系统的 Infiniti Q50	5
图 1-5 IONIC 5 原型车	5
图 1-6 特斯拉 Cybertruck	5
图 1-7 蔚来 ET9	7
图 2-1 线控转向系统结构图	11
图 2-2 线控转向原理示意图	12
图 2-3 线控转向系统方向盘总成结构图	13
图 2-4 线控转向系统转向总成结构图	14
图 2-5 权重值与车速函数关系曲线图	20
图 2-6 混沌映射和随机数效果对比图	24
图 2-7 改进蛭螂算法 IDBO 流程图	26
图 2-8 改进蛭螂算法(IDBO)与蛭螂算法(DBO)优化结果对比图	28
图 2-9 转向增益迭代图	28
图 3-1 车轮受力分析图	31
图 3-2 魔术公式输入输出参数图	33
图 3-3 Carsim 轮胎参数设置图	34
图 3-4 侧向力变化图	34
图 3-5 调节函数 α 迭代图	40
图 3-6 调节参数 δ 迭代图	41
图 4-1 LQR 控制策略原理图	44
图 4-2 动态因子 αe 变化曲线图	47
图 4-3 路感电机控制模型	48
图 4-4 速度环 PI 参数迭代图	51

图 4-5 位置环 PI 参数迭代图	51
图 5-1 Carsim 车辆模型参数.....	53
图 5-2 Prescan 软件仿真场景.....	54
图 5-3 联合仿真模型	55
图 5-4 传动比与车速关系图	56
图 5-5 SMC-LQR 和 PID 控制效果对比图.....	58
图 5-6 线控转向实验台架	58
图 5-7 路感力矩仿真实验结果图	59
图 5-8 线控底盘	60
图 5-9 实车实验	61
图 5-10 蛇形工况转角对比曲线图	61
图 5-11 蛇形工况路感力矩曲线图	62

插表清单

表 2-1 优化前和优化后各指标门槛值	19
表 3-1 魔术轮胎公式参数表	35
表 5-1 运动学参数	54
表 5-2 PID 控制策略各参数	57
表 5-3 模拟与理想扭矩的误差表	60
表 5-4 实车试验模型误差表	63

第1章 绪论

1.1 课题背景及研究意义

近年来,我国智能网联汽车销量呈现显著增长趋势,如图 1-1 所示,预计 2025 年销量将突破 2490 万辆,这一变化主要得益于人工智能(如 BEV+Transformer 感知框架)、5G 通信(如 5G-V2X 通信协议)以及新能源等技术(如高能量密度电池技术)的快速发展。随着这些技术的不断成熟和应用,具备自动驾驶和车路协同功能的智能网联汽车已成为汽车行业未来发展的新方向^{[1]-[3]}。汽车转向系统不仅是无人驾驶汽车的执行终端,也是智能网联汽车线控集成底盘重要一环。不同于一体化的传统机械传动转向系统,线控转向系统将转向管柱和车轮之间的机械连接解耦,实施分块化管理,使得整个转向系统能够更好地与线控制动、线控悬架等系统完成整合^[4]。同时线控转向技术的人机交互分离也是对 L4 级无人驾驶的探索之一,通过引入传感器和整车控制器等技术实现对汽车转向的智能化、电控化,减少主动驾驶的参与度,极大提高了驾驶活动的安全性和稳定性,因此线控转向技术逐渐成为汽车领域的研究热点之一^[5]。

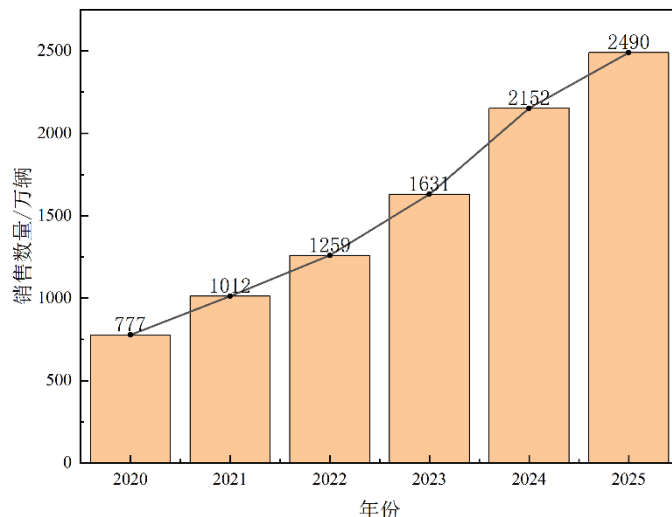


图 1-1 2020-2025（预测）智能网联汽车销量

传统的机械转向系统通过机械连接可以将驾驶员的指令施加给车轮完成转向,承接方向盘和车轮转向的转向轴等部分拥有结构简单、制造简易、反馈真实等优点^[6]。然而,这种系统也存在刚性大,硬度大等问题,会造成转向困难,并

给驾驶员带来非常大的体力负担，这些问题在大型货车上会显得格外突出。为了解决传统机械转向系统的不足，研究人员在传统机械传动的基础上设计了液压助力转向系统(Electro Hydraulic Power Steering, EHPS)，该系统主要由转向油泵、液压泵和转向控制阀等组成，具备敏感度高、过滤路面震动等优点。然而，随着技术的推广，液压助力转向系统也逐渐暴露出一些问题，如能源利用效率低、油液泄漏造成的环境污染、高速路感差、噪声大等^[7]。电动助力转向技术(Electric Power Steering, EPS)将电机控制引入液压动力系统，主要由扭矩传感器、车速传感器、电动机、减速机构和转向控制单元(Electronic Control Unit, ECU)等组成，利用电机的易控制、高效率等优点对系统做出了优化。如图 1-2 所示，改善了油液系统污染环境、控制精度低等缺点，同时还能利用装载在方向盘管柱上的路感电机补全电动汽车等车型缺失的方向盘力矩特性，避免“虚浮感”，结合整车控制器(Vehicle Control Unit, VCU)在不同车速下调整方向盘的灵敏度，提高驾驶员的驾驶体验^[8]。



图 1-2 电动助力转向结构图

线控转向系统在电动助力转向系统的基础上进一步取消了方向盘和车轮之间的机械连接，如图 1-3 所示，利用安装在方向盘转向柱上的力矩和角度传感器接收来自驾驶员的信号并传递给转向控制器 ECU，从而控制转向电机完成驾驶员到车轮的单向控制。完全机械解耦的线控转向系统相比机械转向系统、电动助力转向系统等节省了更多物理空间，提高了转向精度，并且通过 ECU 的调节可以随着车速、路况等外界因素的变化提供给驾驶员稳定、轻便的驾驶体验，这些优点让线控转向技术迅速在诸多转向系统中脱颖而出，成为当前研究领域的热门之一^[9]。



图 1-3 线控转向结构图（蔚来）

线控转向技术作为智能网联汽车前沿领域，包含了很多新型关键技术^[10]，如下所示：

(1) 路感模拟技术：由于取消了物理连接，驾驶员无法像机械转向系统一样直接获得回正力矩等路面信息。为解决这一问题，路感反馈系统利用安装在方向盘转向柱上的路感电机，通过不同传感器采集车辆数据或 ECU 控制算法模拟等方式，以高频振动等方式模拟车辆与路面之间的机械力，提高驾驶员的物理交互感^[11]。

(2) Can 通信技术：线控转向技术相较于其他转向系统应用了大量电子元件，并于刹车系统、悬架系统完成了汽车底盘的集成，高度依赖 ECU 和各传感器之间的信息交互。因此，Can 通信协议以其多主控制、系统若软性、自主检测、警告和错误修复、故障封闭、连接节点多等特点在线控转向系统中发挥着十分重要的功能^[12]。

(3) 电机控制技术：线控转向系统对复杂环境的鲁棒性会由于电机受到电压变化、路面冲击、老化、温度等外在因素的影响而下降。为了提高电机输出的精度，需要相应的控制技术从不同角度优化电机的误差^[13]。

(4) 变传动比技术：传统机械转向汽车在起步时，轮胎与地面存在滑动摩擦等因素影响，驾驶员需要提供较大的转向力矩。而在高速行驶中，轮胎与地面的滑动摩擦转变为转动摩擦，只需要一个很小的转向力矩就能完成车轮的大幅度转向动作。针对这种情况，线控转向技术可以根据车速改变转向传动比，减轻汽车低速时候的转向负担，抑制高速时大幅度转向动作，同时减小方向盘的转向幅度，

提高驾驶舒适度和安全性^[14]。

(5) 容错技术：线控转向系统的主体为 ECU，可靠性远低于机械传动，因此容错技术对系统的安全性至关重要。现阶段的容错技术主要集中于冗余系统的设计和对传感器技术的提高上^[15]。

路感模拟技术作为线控转向系统中驾驶员与路面信息沟通的桥梁，直接影响驾驶安全和驾驶体验^[16]。因此，路感力矩的模型计算精度以及路感电机的控制策略等问题尤为关键。本文将从这两个方面对路感模拟技术进行优化，提高系统的鲁棒性和真实性。

1.2 线控转向系统国内外研究现状

线控转向技术最早起源于航空航天领域，用于替代传统笨重的机械结构，减轻飞机内部空间的压力^[17]。自上世纪五十年代首次提出将其应用于汽车以来，线控转向系统经过几十年的发展，已经在部分国外车型上实现了量产，与传统机械转向、油液转向，甚至电动助力转向技术相比展示出巨大优势。

上世纪五十年代，天合公司首次提出利用电子信号替代转向轴，并邀请了德国工程师 Kassermann 和 Keranen 合作，建立了第一个线控转向模型^[18]。尽管由于当时的技术限制，该研究未能成功继续，但这种探索并未停止。1990 年后，德国汽车工业呈现井喷式发展，线控转向技术也成为研究重点，梅赛德斯-奔驰推出了概念车 F400，搭载了当时非常先进的技术，包括电控主动液压减震器、悬架系统、制动系统、线控转向技术等，体现了当时工程师们对未来汽车技术的前瞻性思考^[19]。

千禧年后，线控转向技术的研究逐渐走向国际化。2003 年，丰田汽车公司旗下的 Caltz 设计中心在纽约国际车展上展示了搭载线控转向技术的 Lexus HPX 概念车^[20]。2013 年，英菲尼迪日产推出了全球首款量产线控转向汽车 Infiniti Q50，如图 1-4 所示。该车搭载了 DAS 线控转向和冗余系统，以确保主转向电机发生故障时备用电机能够迅速接替，从而提升行车安全性^[21]。



图 1-4 搭载 DAS 系统的 Infiniti Q50

在美国拉斯维加斯举行的 2023 年消费电子展上，现代摩比斯公司展示了一款搭载 e-corner 模块技术的 IONIC 5 原型车，如图 1-5 所示。e-corner 模块集成了线控转向、线控悬架、线控刹车等多项技术，并分别在四个车轮上都安装了轮毂电机，使得同一方向上车辆的四个车轮都能做到最大 90° 的转动，实现原地掉头、蟹行、定圆、斜行等高难度动作。



图 1-5 IONIC 5 原型车

2023 年 11 月，特斯拉正式投产了旗下的纯电动皮卡 Cybertruck，如图 1-6 所示。Cybertruck 采用了复数转向控制单元、电机和专用通信网络，构建了一个完全解耦的转向系统。2024 年特斯拉 Cybertruck 在美国市场的销量也充分展示了消费者对线控转向等新兴技术的高度认可，验证了线控转向系统在实际应用中的可行性，也反映出市场对智能化、自动化技术的日益重视^{[22]-[23]}。



图 1-6 特斯拉 Cybertruck

2021 年我国发布的《汽车转向系统基本要求》(GB 17675-2021)标准,是汽车行业迈向智能化的重要一步。该标准删除了对转向系统方向盘和车轮物理解耦的限制,为线控转向技术的应用提供了制度保障^[24]。《新能源汽车产业发展规划》(2021-2035 年)进一步明确了未来汽车技术的发展方向,将纯电动汽车底盘一体化、线控执行系统等列为重点攻关领域,并特别强调了线控转向技术在智能驾驶汽车中的核心地位^[25]。除此之外,由中国汽车技术研究中心牵头,联合集度、蔚来、吉利等国内领先车企共同制定的线控转向国家标准,已获得国家标准化管理委员会的正式批准。这一标准的出台,不仅为线控转向技术的推广奠定了坚实的制度基础,也为我国智能网联汽车产业的快速发展注入了强劲动力^[26]。

随着线控转向技术的不断成熟以及国内政策的支持,越来越多的国内高校和企业也开始启动相关科研项目。2004 年 11 月 4 日,同济大学在第六届上海工业博览会上展示了自主研发的无人驾驶概念车“春晖三号”,该车的外观设计灵感来源于甲壳虫,配备了动力蓄电池和小功率燃料电池系统,采用了“和欣”操作系统,是国内首款搭载线控转向技术的电动汽车,标志着中国在线控转向领域迈出了重要一步^[27]。2010 年 4 月,长安汽车在北京车展上亮相了自主研发的 Green-i 纯电动概念车。Green-i 搭载了制动能量回收、快速充电等技术,提升了电动汽车的能源利用效率和续航能力^[28]。

2024 年 12 月 21 日,蔚来智能电动行政旗舰车 ET9 正式发售,如图 1-7 所示,作为中国首款获得工信部认证的搭载线控转向技术的量产车型,相比特斯拉在研究线控转向技术上倾向于系统安全备份,蔚来更注重手感和舒适度,ET9 搭载的线控转向系统在响应速度上相较于同款车型的电动助力转向提升了 30%,转向精度精确达到 $\pm 0.5^\circ$,极大地增强了驾驶的精确性和稳定性。在低速泊车或复杂路况下,该系统的转向比可低至 6:1,提供了更灵活的操控体验,而在中高速行驶时,转向比则可提升至 14:1,确保驾驶更加平稳和精准。此外,在高速爆胎等突发紧急情况下,蔚来 ET9 配备的 VMC 底盘智算平台能够在 300 ms 内迅速调动各个系统,实时调整车辆的动态响应,确保车辆稳定并有效避免方向偏离^[29]。



图 1-7 蔚来 ET9

1.3 路感模拟技术国内外研究现状

1.3.1 路感系统数学框架研究现状

由于线控转向技术取消了转向管柱，方向盘和车轮之间失去了机械连接，驾驶员无法直接获得来自路面的实时信息，所以为了驾驶的安全性和舒适性，线控转向系统就需要通过路感电机向驾驶员模拟机械传动下的路感反馈信号^[30]。而路感系统数学框架的建立主要分成以下三种类型：

(1) 传感器测量法：通过安装在齿轮齿条处的压力传感器实时监控转向横拉杆受到来自车轮的压力，并将数据传输到 ECU 控制器计算路感力矩^[31]。

(2) 动力学模型算法：搭建车辆转向系统动力学模型，通过车速、车轮转角等参数计算回正力矩，最终获得路感力矩^[32]。

(3) 参数拟合法：研究车辆理论状态下转向时路感力矩影响因素，包括车速，加速度，方向盘转角等，通过函数拟合得到路感力矩与诸因素之间的函数关系^[33]。

北京化工大学机电工程学院的常斌^[34]设计了传感器测量法，并分析了悬架系统、动力系统、制动系统对路感力矩模拟的影响。谢有浩^[35]通过动力学模型算法建立了方向盘摩擦力矩补偿后的路感力矩模型，并设置仿真模拟实验和台架实验对模型进行了验证。任夏楠^[36]结合方向盘转矩的影响因素建立了一个描述稳态转向工况的力矩模型。解后循^[37]介绍了传统路感力矩的计算方法，并提出路感力矩的计算应当考虑考虑方向盘力矩及转角大小。吴瑾^[38]以回正力矩为核心，辅助路感修正公式建立了路感力矩模型，刘书翰等人^[39]设计了基于时间窗的主

动回正状态判断机制,并以轮胎回正力矩为基础建立了回正转速参考模型以及主动回正滑模控制策略。

从诸多文献中可以发现传感器测量法虽然模拟效果较为精确,但是安装高精度传感器一方面提高了成本,另一方面减小了转向系统的空间利用率,同时也会受到工作环境的限制,并不是最优的选择。参数拟合法成本低,操作简单,但是相较于动力学模型算法模拟结果不够真实。动力学模型算法由于涉及到转向系统中的多个复杂参数,因此需要较高的算力。然而,近年来随着科技的不断进步,ECU 的计算能力已足以处理这些信号和参数。综上所述,本文将采用动力学模型算法建立路感力矩模型,并结合路感力矩、车轮侧向力和无迹卡尔曼滤波进行优化,以提高模型的真实性和准确性。

1.3.2 路感系统优化策略研究现状

文媛媛^[40]利用车辆动力学方程对线控转向系统进行了建模,优化了滑模变结构控制原理,并基于新趋近律设计了路感电机控制器。最终,通过操纵稳定性实验和双扭线实验验证了新趋近律的滑模控制策略在路感电机控制中的优越性。谢立刚^[41]通过联合仿真平台建立了线控转向整车模型和路感力矩模拟模型,并利用粒子群算法优化后的 PID 控制策略对模型路感力矩输出进行控制,最后通过实车实验证明模型的有效性。龙安源^[42]认为线控转向路感模拟精度是关乎驾驶安全的至关重要的部分,在基于传感器噪声和系统内部干扰的传统路感力矩补偿策略的基础上,提出静态摩擦补偿策略、转动惯量补偿策略、阻尼补偿策略完善路感力矩模型,最后通过线控转向实验台架完成了控制器的 PCB 设计,验证了模型的正确性。Liu, H^[43]提出了一种新颖的转向路感设计和转向扭矩控制的闭环控制策略。利用卡尔曼滤波(Kalman Filter, KF)估计转向齿条上的初级力,实现基本的转向梯度和刚度特,并设计了一种基于车轮执行器(RWA)的电机电流和齿条位移测量值的补充策略观察齿条力,最后通过 Carism 和 Matlab/Simulink 的联合仿真和实车试验证明了所设计的控制方案具有较好的驾驶体验。为了提供详细的道路反馈并有效管理复杂的转向场景,杨蕊绽^[44]开发了一种补充策略来观察齿条力,利用 Carsim 建立了不包含转向系统的整车模型,以联合仿真的方法嵌

入 Matlab/Simulink 的线控转向模型和主力矩、补偿力矩和主动回正力矩相互叠加的路感力矩计算模型，完成对线控转向系统路感力矩模拟实验模型的构建，最后利用中心区转向试验和自由驾驶试验与回正试验完成了对模型的验证工作。

Liang, WH^[45]提出了一种分层路感力矩控制策略，其中上层为不确定系统的路感力矩控制方法，下层为基于扩展卡尔曼滤波的电流谐波抑制策略，并针对所建立的控制策略设计了 Carsim 与 Simulink 仿真实验和线控转向台架试验，验证了该控制策略对复杂的路感反馈系统具有较高鲁棒性。Kirli^[46]在论文中考虑了驾驶员的体力负荷和横向加速度，在保证驾驶性能的前提下利用魔术轮胎公式建立了基于滞后路感的数学模型，并通过双移线工况验证了模型的正确性，最后对文章所构建的理论部分进行了实车驾驶测试。

上述文献介绍了多种优化路感力矩计算模型的方法，例如 PID 和 SMC 策略的优化，静态摩擦力矩的补偿策略，以及基于电流谐波抑制策略的双层优化结构等。无论是从路感力矩计算模型本身进行修正，还是从系统层面对路感电机进行上层控制，都显得较为单一。本文将从转向传动比增益优化、方向盘摩擦力矩、传感器噪声过滤等角度对路感力矩计算模型进行修正，利用所设计的 SMC-LQR 融合控制策略对路感反馈系统的误差进行上层（系统）控制以及矢量控制对路感电机的转矩和转速输出进行下层（路感电机）控制。

1.4 研究内容

本文基于前人在线控转向领域的工作，开展对路感模拟技术优化的研究，以汽车转向系统的动力学模型为基础建立路感力矩的模拟模型，通过方向盘摩擦力矩、群智能算法、基于 Carism 的车轮侧偏力拟合方程和无迹卡尔曼滤波进一步优化模型。融合 SMC 和 LQR 建立新融合控制策略，结合基于群智能算法优化参数的矢量控制完成对路感电机转矩和转速的精准控制。最后，在 Carsim 汽车动力学仿真软件中建立合适的汽车整车动力学模型，通过引入 Prescan 虚拟仿真软件中搭建的转向性能测试路况，完成对 Matlab/Simulink 中路感力矩模型的调试和修正。

本论文主要分成六个章节，各章节具体内容如下所示：

第 1 章：绪论。阐述本次研究的背景和研究意义，对线控转向技术的研究现状进行调研，分析现阶段路感反馈技术存在的问题，包括通过合适的方法建立路感力矩模型以及路感电机控制策略优化等。并在章节结尾叙述本论文的研究目的和各章节具体内容。

第 2 章：线控转向系统的建模和仿真。本章基于汽车转向系统的动力学方程，建立包含方向盘模块与转向执行模块的线控转向模型。改进传统蜣螂算法，通过引入混沌映射、黄金正弦策略和惩罚函数，增强了算法的全局搜索能力和收敛速度，并以车辆稳定性指标为目标函数，优化转向增益，确保不同车速下的转向稳定性。

第 3 章：路感模拟系统的建模与优化。本章在第二章的基础上进行了路感力矩模型的搭建与优化。以车辆转向系统的动力学方程和方向盘摩擦力矩模型为基础，建立了路感力矩模型，引入魔术轮胎公式优化车轮侧向力的计算。最后，引入无迹卡尔曼滤波过滤传感器的信号。

第 4 章：路感电机控制策略研究。建立 SMC-LQR 融合控制策略，利用切换函数的方法消除 SMC 控制策略在误差较小时出现的抖动现象。建立矢量控制策略，通过独立控制电机的转矩和磁场，确保 SMC-LQR 控制策略的控制效果。

第 5 章：路感反馈系统虚拟仿真实验。根据第二章、第三章、第四章搭建 Matlab/Simulink 力矩计算模型和 Carsim 汽车动力学模型，并在 Prescan 平台上搭建特定路况下的汽车转向仿真环境。最后进行联合仿真实验和路感反馈系统实车实验，将控制系统编写成代码写入转向控制单元中，布置实验所需的场地，完成路感反馈系统的实车实验。

第 6 章：总结与展望。对本次研究所作的工作进行总结，并对后续工作的方向进行展望。

第2章 线控转向系统的建模和仿真

为了深入研究和优化线控转向路感反馈系统，首先必须构建一个准确、完整的线控转向模型。因此，本章将使用降阶建模的方法对线控转向系统进行动力学建模，通过简化系统的复杂度，使模型在保证精度的前提下，能够有效地提高计算效率^[47]。结合群智能算法，通过引入车辆操控稳定性指标作为目标函数，优化转向增益，计算最佳转向传动比，提升系统的响应性能和稳定性。确保在不同驾驶工况下，线控转向系统能够提供精确的路感反馈和舒适的驾驶体验。

2.1 线控转向系统结构及工作原理

2.1.1 线控转向系统结构

线控转向系统主要由方向盘总成、转向执行总成、控制单元（转向控制器和整车控制器）、容错系统和电源系统所组成，如图 2-1 所示。

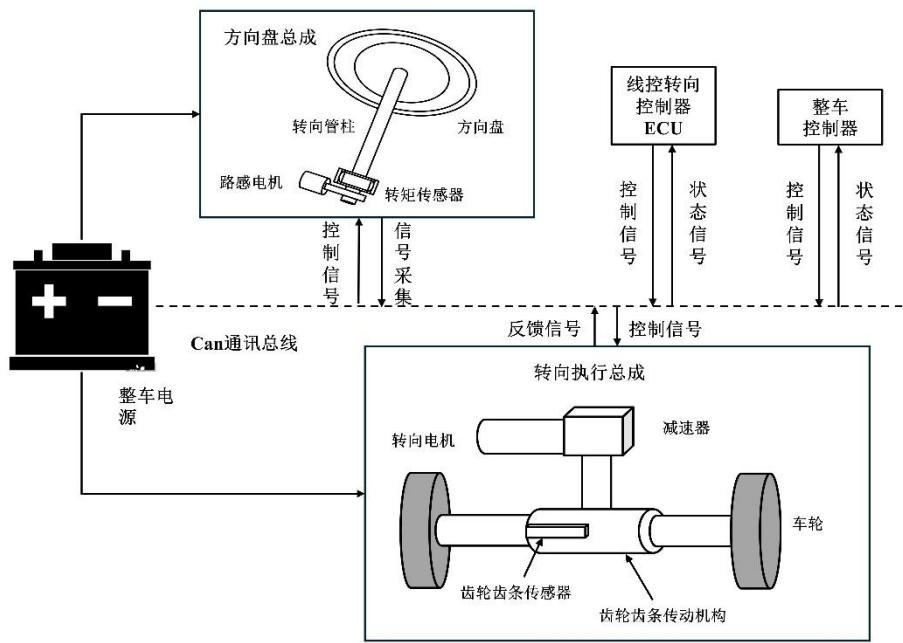


图 2-1 线控转向系统结构图

方向盘总成包括方向盘、转矩和转角传感器、减速器和路感电机，主要作用是采集驾驶员的指令信息以及路感模拟。在这个过程中转矩和转角传感器会通过电信号而不是传统的力信号与 ECU 沟通，同时路感电机将接收来自 ECU 的控

制并以反向力矩的形式反馈给方向盘模拟路感^[48]。

转向执行总成包括转向电机以及减速器、齿轮齿条转向器、转角传感器。在整个线控转向系统中转向执行总成将接收来自 ECU 控制单元的信号，由转向电机输出转矩，完成车轮转向。在转向执行总成完成的过程中如果转向电机出现故障可能导致车轮实际转向与理论转向不匹配，需要在原本结构上耦合第二个转向电机提高系统的容错率。转向执行总成中的转角传感器会采集车轮的实际转角，并将信号传递给 ECU 控制单元计算理论转角与实际转角的差值，最后根据算法控制转向电机的转矩输出减小误差。

ECU 控制单元是线控转向系统中的核心处理系统，接收并处理来自方向盘总成和转向执行总成的信号，并通过算法对车轮的转向误差进行修正。由于整个线控转向系统中取消了转向管柱及相关的机械结构，车轮转向动作的完成和对驾驶员的反馈会十分依赖 ECU 控制单元，因此容错系统也是线控转向系统十分重要的部分，例如双电机冗余线控转向系统。电源系统则为线控转向系统提供动力支持。

2.1.2 线控转向系统原理

线控转向系统与传统转向系统的主要区别在于，前者取消了转向管柱，通过电信号的方式将驾驶员输入的转向信息传递给 ECU 控制单元完成转向活动。在转向的同时，ECU 控制单元又会控制路感电机向方向盘输出阻力矩，模拟路面信息反馈，具体流程如图 2-2 所示^[49]。

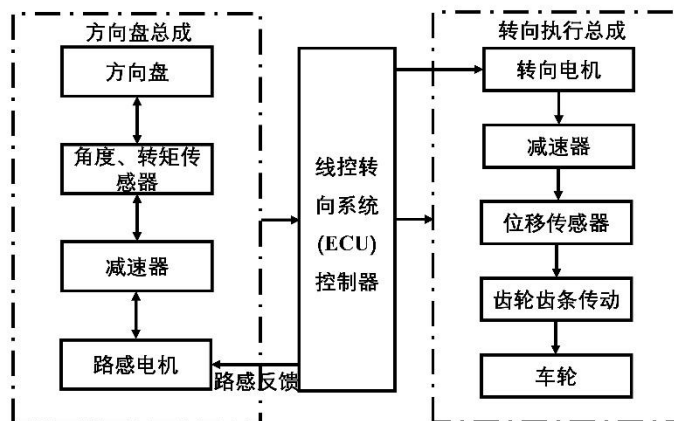


图 2-2 线控转向原理示意图

2.2 线控转向控制系统动力学模型建立

2.2.1 方向盘总成建模

线控转向系统的方向盘总成模块主要包括两个部分：一是从方向盘到转矩传感器的部分，二是从转矩传感器到路感模拟电机的部分，整体结构如图2-3所示。为了对方向盘总成进行建模，首先需要从动力学角度出发，建立其对应的微分方程。

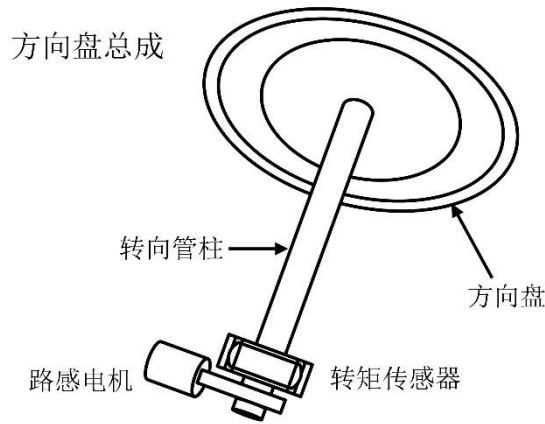


图 2-3 线控转向系统方向盘总成结构图

其中，方向盘到转矩传感器的动力学微分方程如式(2-1)和式(2-2)所示：

$$T_{sw} = J_{sw} \ddot{\theta}_{sw} + B_{sw} \dot{\theta}_{sw} + T_{sc} + T_{fsw} \quad (2-1)$$

$$T_{sc} = k_c \left(\theta_{sw} - \frac{\theta_m}{g_m} \right) \quad (2-2)$$

式中： T_{sw} 为方向盘转矩； T_{sc} 为转向管柱力矩； T_{fsw} 为方向盘的摩擦力矩； B_{sw} 为方向盘转向柱的阻尼系数； θ_m 为路感电机转角； θ_{sw} 为方向盘的转角； J_{sw} 为方向盘转向柱的转动惯量； k_c 为方向盘转向柱扭转刚度； g_m 为路感电机的减速比。

转矩传感器到路感电机的动力学微分方程如式(2-3)所示：

$$T_m = J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + \frac{k_c}{g_m} \left(\frac{\theta_m}{g_m} - \theta_{sw} \right) \quad (2-3)$$

式中： T_m 为路感电机转矩； B_m 为路感电机阻尼系数； θ_m 为路感电机转角； J_m 为路感电机转动惯量。

根据基尔霍夫定律可得，路感电机的电平衡方程如式(2-4)和式(2-5)所示：

$$U_m = R_m I_m + L_m \dot{I}_m + K_{t1} \dot{\theta}_m \quad (2-4)$$

$$T_m = \frac{Pn\phi I_m}{2\pi a} = C_N \phi I_m = K_{a1} I_m \quad (2-5)$$

式中： U_m 为路感电机的端电压； L_m 为路感电机的等效电感； R_m 为路感电机的等效电阻； I_m 为路感电机的电流； K_{a1} 为路感电机的电动势系数； K_{t1} 为路感电机的反电动势系数。

2.2.2 转向总成建模

线控转向系统转向总成主要由转向电机到车轮部分组成，如图 2-4 所示。

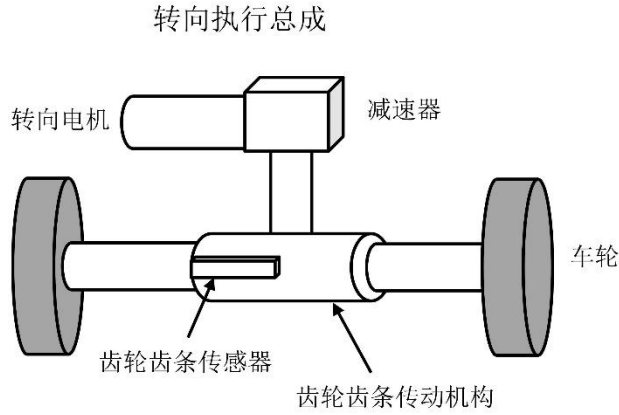


图 2-4 线控转向系统转向总成结构图

同 2.1.1 建立转向总成部分的动力学微分方程。

转向电机工作产生的电磁转矩需要克服系统内部的惯性力矩和阻力力矩经过减速器传递到齿轮齿条转向器，其动力学微分方程表示如式(2-6)所示：

$$T_{fm} = J_{fm} \ddot{\theta}_{fm} + B_{fm} \dot{\theta}_{fm} + T_{fa} \quad (2-6)$$

式中： T_{fm} 为转向电机的电磁转矩； J_{fm} 为转向电机的转动惯量； B_{fm} 为转向电机的阻尼系数； T_{fa} 为转向电机的输出转矩； θ_{fm} 为转向电机的转角。

齿轮齿条传动器的作用是将转向电机输出的旋转运动转化成齿条的水平运动，最后通过转向横拉杆和转向节实现车轮的转向。在这个过程中转向电机输出的转矩需要克服齿轮齿条本身的惯量力矩和阻力力矩，其动力学微分方程如式(2-7)所示：

$$T_r = k_r \left(\theta_{em} - \frac{x_r}{r_p} \right) \quad (2-7)$$

式中： k_r 为转向总成系统等效刚度； x_r 为齿条位移； r_p 为小齿轮分度圆半径。

齿轮齿条传动器的作用是将转向电机输出的旋转运动转化成齿条的水平运动，最后通过转向横拉杆和转向节实现车轮的转向。在这个过程中转向电机输出的转矩需要克服齿轮齿条本身的惯性力和阻力，齿条受力和齿条位移的关系式可由牛顿第二定律得：

$$\frac{T_r}{r_p} = M_r \ddot{X}_r + B_r \dot{X}_r + F_{fr} + \frac{T_{lw}}{L_{lw}} + \frac{T_{rw}}{L_{rw}} \quad (2-8)$$

式中： T_r 为转向器所受力矩； F_{fr} 为转向器系统内部摩擦力； T_{lw} 和 T_{rw} 为左右车轮主销力矩； L_{lw} 和 L_{rw} 为左右转向摇臂长度。

转向电机与路感电机相同，根据基尔霍夫定律，电平衡方程如式(2-9)和式(2-10)所示：

$$U_{em} = R_{em} I_{em} + L_{em} \dot{I}_{em} + K_{t2} \dot{\theta}_{em} \quad (2-9)$$

$$T_{em} = \frac{Pn\phi I_{em}}{2\pi a} = C_N \phi I_{em} = K_{a2} I_{em} \quad (2-10)$$

式中： U_{em} 为转向电机的端电压， I_{em} 为转向电机等效电流， R_{em} 为转向电机等效电阻， L_{em} 为转向电机等效电感， K_{t2} 为转向电机的反电动势系数， K_{a2} 为转向电机的电动势系数。

2.3 变传动比设计

线控转向系统通过路感电机和转向电机取代传统机械结构，实现车辆转向功能，这种设计为转向传动比的调整提供了高度灵活性。为了在低速转向时提供轻便的手感，同时在高速转向时确保稳定性，系统采用变传动比策略作为“软约束”，动态调节转向电机的输出，从而优化驾驶体验并提升车辆操控性能。^[50]

现阶段对线控转向变传动比的设计主要有以下三种方法：

(1)定增益法：通过寻找车速与传动比之间的函数关系，使得转向增益保持在一个定值^[51]。该方法简单高效，但是由于没有考虑方向盘转向特性的影响，

缺乏真实性。

(2)变增益法：结合不同车速下不同因素对传动比的影响，设计分段变传动比函数^[52]。该方法在车速分段处会产生突变现象，影响驾驶员的手感。

(3)智能算法：引入遗传算法、神经网络等智能算法构建方向盘转角、车速等多因素输入，单输出的变传动比模型^[53-54]。这种方法虽然结构较为复杂，计算量大，但随着电子科技技术的进步，计算机的性能得到了极大的解放，且同时具备着定增益法和变增益法所不具备的实时性，成为了当前诸多研究员的重点研究方向。

综上，本文将基于汽车二自由度模型建立定增益下的变传动比模型，引入改进后的蜣螂优化算法，对转向增益值进行优化。

2.3.1 变传动比模型

汽车二自由度模型如式(2-11)和式(2-12)所示：

$$(k_1 + k_2)\beta + \frac{1}{u}(ak_1 - bk_2)\omega_r - k_1\theta = m(v + u\omega_r) \quad (2-11)$$

$$(ak_1 + bk_2)\beta + \frac{1}{u}(a^2k_1 - b^2k_2)\omega_r - ak_1\theta = I_z\omega_r \quad (2-12)$$

式中： β 为汽车质心侧偏角； u 为质心速度在 x 轴的分量； ω_r 为汽车横摆角速度； θ 为前轮转角； m 为汽车整备质量； v 为质心速度在 y 轴的分量； I_z 为汽车绕 z 轴的转动惯量； k_1 和 k_2 为车辆前后轮侧偏刚度； a 和 b 为车辆质心到前后轴距离。

可以基于横摆角速度不变来设计可变传动比，预设计一个横摆角速度增益 k_ω ，则关于可变传动比的横摆角速度公式如式(2-13)所示：

$$\omega = k_\omega \theta_{sw} = k_\omega \theta_i = \frac{v\theta}{1 + \frac{mv^2}{l^2} \left(\frac{a}{2k_1} - \frac{b}{2k_2} \right)} \quad (2-13)$$

整理可得可变传动比 i 的公式如式(2-14)所示：

$$i = \frac{v}{k_\omega \left[1 + \frac{mv^2}{l^2} \left(\frac{a}{2k_1} - \frac{b}{2k_2} \right) \right]} \quad (2-14)$$

2.3.2 操控稳定性评价指标

郭孔辉院士^[55]提出的操控稳定性指标包括了轨迹跟踪指标、操控负担指标、翻车危险性指标、侧滑危险性指标、驾驶员路感指标，具有高综合性、高相关性等优点，能够从多方面对车辆的稳定性和安全性进行评判。本次研究将参考该操控稳定性指标，作为转向增益的优化目标函数，车辆操控稳定性各指标具体计算函数如下所示。

(1) 轨迹跟踪指标

包含路径跟踪误差指标和方向误差指标如式(2-15)和式(2-16)所示：

$$J_{e1} = \int_0^{t_n} \left[\frac{f(t) - y(t)}{\hat{E}} \right]^2 dt \quad (2-15)$$

$$J_{e2} = \int_0^{t_n} \left[\frac{v_x(t)\beta(t)}{\hat{B}} \right]^2 dt \quad (2-16)$$

式中： J_{e1} 、 J_{e2} 分别为路径跟踪指标和方向误差指标； t_n 为实验时长； $f(t)$ 为期望轨迹； $y(t)$ 实际轨迹； $\hat{E}$ 为轨迹误差标准阈值； v_x 为汽车质心纵向车速； $\beta(t)$ 为汽车质心偏转角； $\hat{B}$ 为方向误差标准阈值。

进行加权计算后得到轨迹跟踪指标如式(2-17)所示：

$$J_E = \sqrt{\frac{W_{e1}J_{e1}^2 + W_{e2}J_{e2}^2}{W_{e1} + W_{e2}}} \quad (2-17)$$

式中： J_E 为轨迹跟踪指标； W_{e1} 、 W_{e2} 分别为路径跟踪指标和方向误差指标加权值。

(2) 操纵负担指标

包含驾驶员忙碌程度和沉重程度如式(2-18)所示：

$$J_{b1} = \int_0^{t_n} \left[\frac{\dot{\delta}_{sw}(t)}{\dot{\delta}_{sw}} \right]^2 dt \quad (2-18)$$

式中： J_{b1} 、 J_{b2} 分别为驾驶员忙碌程度和沉重程度； $\dot{\delta}_{sw}$ 为方向转动角速度； $\widehat{\delta}_{sw}$ 为方向盘标准角速度阈值； T_{sw} 为方向盘力矩； $\widehat{T_{sw}}$ 为方向盘标准力矩阈值。

进行加权计算后得到操纵负担指标如(2-19)所示：

$$J_B = \sqrt{\frac{W_{b1}J_{b1}^2 + W_{b2}J_{b2}^2}{W_{b1} + W_{b2}}} \quad (2-19)$$

式中： J_B 为操纵负担指标； W_{b1} 、 W_{b2} 为驾驶员忙碌程度和城中程度加权值。

(3)翻车危险评价指标

包含侧向加速度指标和侧倾角指标如式(2-20)和式(2-21)所示：

$$J_{r1} = \int_0^{t_n} \left[\frac{a_y(t)}{\hat{a}_y} \right]^2 dt \quad (2-20)$$

$$J_{r2} = \int_0^{t_n} \left[\frac{\phi(t)}{\hat{\phi}} \right]^2 dt \quad (2-21)$$

式中： J_{r1} 、 J_{r2} 分别是侧向加速度指标和侧倾角指标； a_y 为汽车侧向加速度； $\hat{a}_y$ 为侧向加速度标准阈值； ϕ 为汽车侧倾角； $\hat{\phi}$ 为侧倾角标准阈值。

进行加权计算后得到翻车危险评价指标如式(2-22)所示：

$$J_R = \sqrt{\frac{W_{r1}J_{r1}^2 + W_{r2}J_{r2}^2}{W_{r1} + W_{r2}}} \quad (2-22)$$

式中： J_R 为翻车危险指标； W_{r1} 、 W_{r2} 为侧向加速度指标和侧倾角指标加权值。

(4)侧滑危险性指标

侧滑危险性指标如式(2-23)、式(2-24)和式(2-25)所示：

$$J_{si} = \int_0^{t_n} \left[\frac{F_{yt}(t) / F_{zt}(t)}{\hat{\mu}} \right]^2 dt \quad (2-23)$$

$$J_{si} = \max(J_{sf}, J_{sr}) \quad (2-24)$$

$$i = f, r \quad (2-25)$$

式中： J_s 为侧滑危险性指标； J_{sf} 为前轴侧滑危险性指标； J_{sr} 为后轴侧滑危险性指标； $F_{yt}(t)$ 为前/后轴所受的侧向力； $F_{zt}(t)$ 为前/后轴所受载荷力； $\hat{\mu}$ 为侧向附着系数的标准阈值。

(5)驾驶员路感指标

在驾驶过程中需要充分考虑驾驶员手感，判定方向盘手感的驾驶员路感指标如式(2-26)所示：

$$J_{RF} = \frac{1 - \frac{\int_0^{t_n} [T_{sw}(t)a_y(t)]^2 dt}{\sqrt{\int_0^{t_n} T_{sw}^2(t)dt} \sqrt{\int_0^{t_n} a_y^2(t)dt}}}{\hat{R}} \quad (2-26)$$

式中： J_{RF} 为驾驶员路感指标； $\hat{R}$ 为驾驶员路感指标标准阈值。

轨迹跟踪指标、操作负担指标、翻车危险性指标、侧滑危险性指标和驾驶员路感指标各项参数可以在车辆工况联合仿真中从 Prescan 和 Carsim 实时获取，最终用于测试汽车操控稳定性指标如式(2-27)：

$$J_t = \sqrt{\frac{W_E J_E^2 + W_B J_B^2 + W_R J_R^2 + W_S J_S^2 + W_{RF} J_{RF}^2}{W_E + W_B + W_R + W_S + W_{RF}}} \quad (2-27)$$

式中： W_E 、 W_B 、 W_R 、 W_S 、 W_{RF} 分别为对应指标的权重值。

其中，各指标对应的标准阈值需要参考大量的驾驶员实车实验，本次研究参考郭孔辉院士^[55]给出的实车实验优化后的标准阈值，如表 2-1 所示。

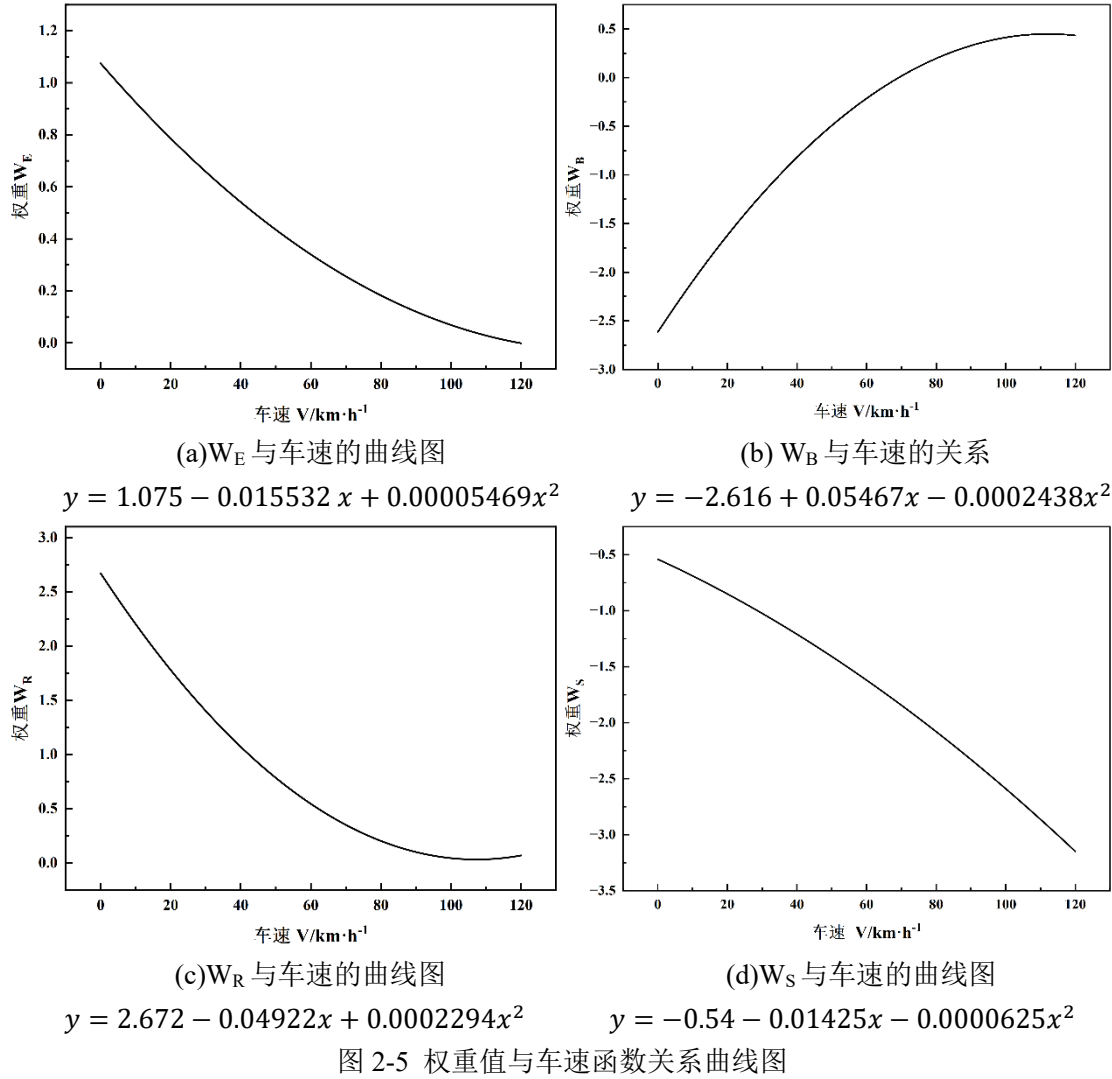
表 2-1 优化前和优化后各指标阈值

符号	优化前经验值	优化后参考值
$\hat{E}$	0.40	0.40
$\hat{B}$	0.80	1.20
$\widehat{\delta_{sw}}$	1.00	2.00
$\widehat{T_{sw}}$	8.00	8.00
$\widehat{a_y}$	3.00	2.25
$\hat{\phi}$	3.00	4.50
$\hat{\mu}$	0.30	0.60
$\hat{R}$	1.00	1.40

由表 2-1 所知，轨迹跟踪指标和方向盘扭矩的阈值优化前后无变化，操控负担指标、方向盘转角速度、横向加速度、侧倾角、路面附着系数、路面附着条件和翻车危险性指标的阈值进行了更严格的约束。优化后的指标阈值更加注重车辆的安全性、动态性能和驾驶舒适性之间的平衡，有助于在复杂驾驶场景中实现更高的操控稳定性和安全性，同时提升驾驶体验。

参考陈明岚^[56]所提出的各指标权重值和车速的关系，如图 2-5 所示（驾驶员

路感指标权重 $W_{RF}=1-W_E-W_B-W_R-W_S$), 本次研究车速取值区间为(0, 120) $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。



2.3.3 基于蜣螂算法优化操控性稳定指标的转向增益

本小节通过 Logistic-Tent-SPM 混沌映射代替伪随机数对蜣螂算法的种群初始化进行改进, 强化算法初期随机数的生成, 扩大搜索范围。利用黄金正弦策略的核心思想, 改进蜣螂算法第一阶段滚球蜣螂在遇到障碍物后的位置更新数学公式, 添加了全局最差位置预警项, 使得改进后的黄金正弦策略在扩大搜索随机性, 加快算法收敛的同时远离全局最差位置。最后通过融合 clip 函数的内部罚函数对蜣螂算法中期繁育球的位置更新进行改进, 使得繁育球的界限, 即产卵区的上下限在随着位置更新浮动的情況下受到二次强约束, 繁育球更新解在靠近边界时受到“惩罚”, 且这个惩罚力度会随着靠近边界的程度增大, 最终对蜣螂算法繁育

球的收敛起到缩小收敛区间的作用。

自然界中, 蜣螂会将推动粪便累积成球, 根据太阳光源辨别方向, 使得自己可以保持直线行驶, 而在遇到没有光源等其他自然因素的时候, 蜣螂会通过跳舞来重新确认前进的方向。蜣螂的球不仅可以作为食物, 还能当作产卵区, 孵化小蜣螂, 除此之外还存在盗窃其余蜣螂小球的行为。Xue^[57]等人在 2023 年通过观察蜣螂推球、跳舞、繁育、觅食、偷窃等生活习性创建了蜣螂算法(Dung Beetle Optimizer, DBO), 其种群由推球蜣螂、繁育球、小蜣螂、小偷蜣螂组成。相比其他寻优算法例如麻雀算法、鲸鱼算法、灰狼算法等, 蜣螂算法具有模型简单, 参数更少, 探索和开发的平衡性更强等优点^[59]。

(1)推球蜣螂

推球蜣螂的位置更新方式如式(2-28)和式(2-29)所示:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + akx_i(t-1) + b\Delta x \quad (2-28)$$

$$\Delta x = |x_i(t) - X^w| \quad (2-29)$$

式中: t 为蜣螂算法迭代次数; $x_i(t)$ 为 t 时刻第 i 个蜣螂所在的位置信息; a 为自然数 1 或者 -1 代表是否遇到了障碍物; $k \in (0, 0.2)$ 表示偏转系数; b 为一个随机数 $\in (0, 1)$; Δx 为光照强度变化; X^w 为全局蜣螂所在最差位置。

当蜣螂的行动遇到障碍会如式(2-30)更新自己的前进路线:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \tan \theta |x_i(t) - x_i(t-1)| \quad (2-30)$$

式中: θ 为蜣螂更新前进路线时的偏移角度。

(2)繁育球

蜣螂会选择一个较为安全的地点产卵, 因此可以通过边界选择策略模拟蜣螂寻找产卵地点, 如式(2-31)、式(2-32)和式(2-32)所示:

$$L_b^* = \max(X^*(1-R), L_b) \quad (2-31)$$

$$U_b^* = \max(X^*(1-R), U_b) \quad (2-32)$$

$$R = 1 - \frac{t}{T_{\min}} \quad (2-33)$$

式中: X^* 为当前蜣螂的最优位置; L_b^* 、 U_b^* 为蜣螂产卵区的上下限; $T_{\min}$ 为最大

迭代次数； Lb 、 Ub 为待优化问题的上下限。

蜣螂的繁育球会跟随最优产卵地的变更而变更，其位置更新如式(2-34)所示：

$$B_i(t+1) = X^* + b_1(B_i(t) - L_b^*) + b_2(B_i(t) - U_b^*) \quad (2-34)$$

式中： $B_i(t)$ 为 t 时刻蜣螂繁育球的位置； b_1 和 b_2 分别为 $1 \times D$ 的独立随机向量； D 表示待优化问题的维度。

(3)小蜣螂

小蜣螂从繁育球中出来后会寻找食物，小蜣螂的最佳觅食区设置如式(2-35)和式(2-36)所示：

$$Lb^b = \max(X^b(1-R), L_b) \quad (2-35)$$

$$Ub^b = \max(X^b(1-R), U_b) \quad (2-36)$$

式中： X^b 为当前蜣螂的最优位置； Lb^b 、 Ub^b 为小蜣螂觅食区的上下限。

随着最佳觅食区域的更新，小蜣螂的位置会如式(2-37)所示进行更新：

$$X_i(t+1) = X_i(t) + C_1(X_i(t) - Lb^b) + C_2(X_i(t) - Ub^b) \quad (2-37)$$

式中： $X_i(t)$ 为 t 时刻第 i 个小蜣螂的位置； C_1 是服从正态分布的随机数； C_2 为(0, 1)中随机向量。

(4)小偷蜣螂

小偷蜣螂会偷窃其他蜣螂的食物，而最佳偷窃食物区域即为式(2-37)所示的最佳觅食区域，故在蜣螂算法迭代过程中，小偷蜣螂的位置如式(2-38)所示更新：

$$X_i(t+1) = X^b + S_g(|X_i(t) - X^*| - |X_i(t) - X^b|) \quad (2-38)$$

式中： $X_i(t)$ 为第 i 个小偷蜣螂在 t 时刻的位置； g 为服从正态分布；且大小为 $1 \cdot D$ 的随机向量； S 为常数。

混沌模型被广泛用于生成混沌序列，进行优化算法种群初始化，具有非线性、抗干扰能力强、长期不可预测性、普适性等优点。本次研究使用 Logistic-Tent-SPM 混沌映射初始化蜣螂算法的种群，融合了 Logistic 混沌系统复杂的混沌动力学特性，Tent 混沌系统的分段处理特性以及 SPM 混沌映射高遍历性特性等优秀特点。原始 Logistic-Tent 混沌映射数学定义如式(2-39)所示：

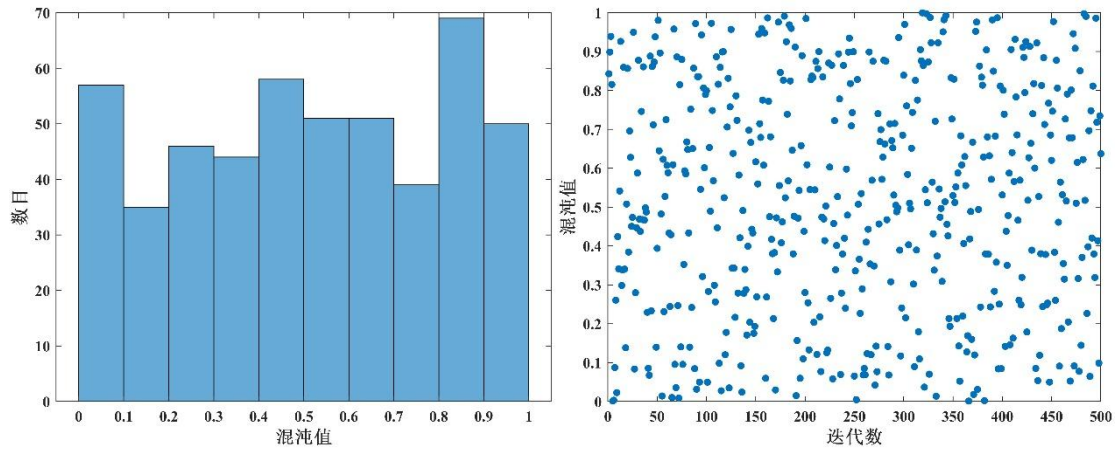
$$x_{i+1} = \begin{cases} (rx_i(1-x_i) + \frac{(4-r)x_i}{2}) \bmod 1, & 0 < x_i < 0.5 \\ (rx_i(1-x_i) + \frac{(4-r)(1-x_i)}{2}) \bmod 1, & 0.5 \leq x_i < 1 \end{cases} \quad (2-39)$$

式中：混沌轨道状态值 x_i 范围为(0, 1)；控制因子 r 的取值范围为(0, 4)。

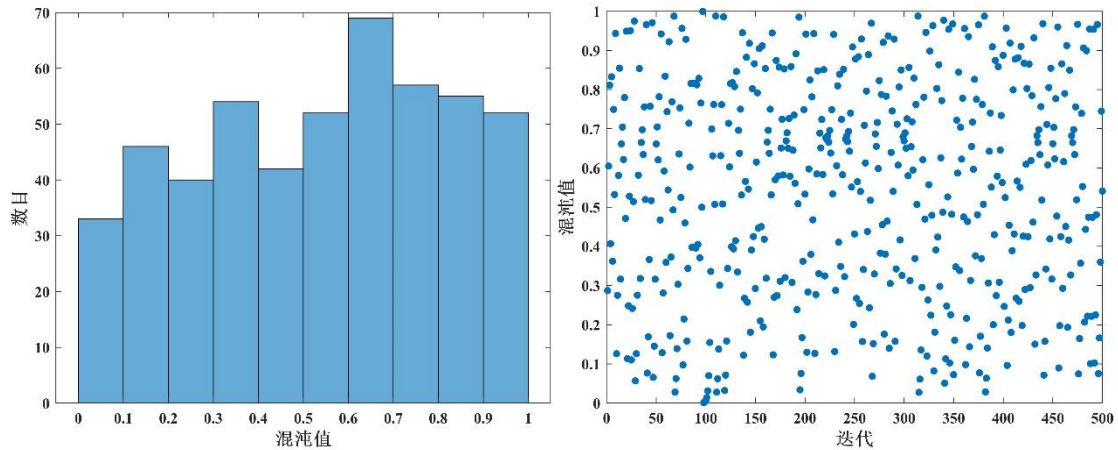
Logistic-Tent 混沌映射产生的混沌值在(0.5, 1)的区间中波动较大，本次研究通过参考 SPM 混沌映射对(0.5, 1)进行二次分段，调整参数后如式(2-40)所示：

$$x_{i+1} = \begin{cases} (rx_i(1-x_i) + \frac{(4-r)x_i}{2}) \bmod 1, & 0 < x_i < 0.5 \\ (25(1-x_i) - \frac{\sin(1-x_i)}{10} + 0.115) \bmod 1, & 0.5 \leq x_i < 0.6 \\ (2.5(1-x_i) - \frac{\sin(1-x_i)}{10} + 0.115) \bmod 1, & 0.6 \leq x_i < 1 \end{cases} \quad (2-40)$$

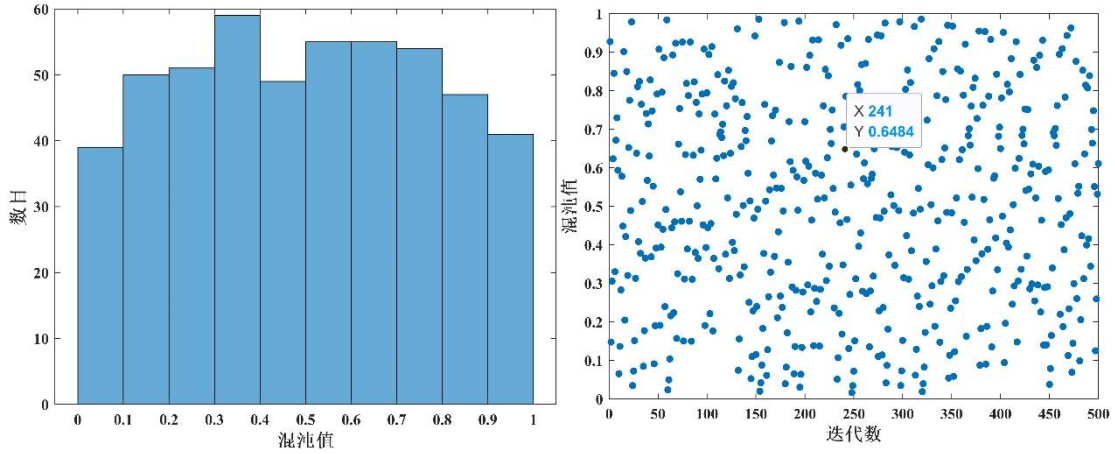
改进后的 Logistic-Tent-SPM 混沌映射效果对比图如图 2-6 所示。



(a) 随机数直方图和散点图



(b) Logistic-Tent 混沌映射直方图和散点图



(c) Logistic-Tent-SPM 混沌映射直方图和散点图

图 2-6 混沌映射和随机数效果对比图

由图 2-6 所示可知，引入 Logistic-Tent-SPM 混沌映射后算法在种群初始化上相比随机数生成和 Logistic-Tent 混沌映射直方图和散点图分布更加平均，说明 Logistic-Tent-SPM 混沌映射在算法搜索范围上比 Logistic-Tent 混沌映射和随机数生成更大，不易陷入局部最优解。

诸如麻雀算法(Sparrow Search Algorithm, SSA)、鲸鱼算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)、灰狼算法(Whale Optimization Algorithm, GWO)尽管在寻优过程中表现出色，但仍存在收敛过程中容易陷入局部最优的问题。本文所采用的蜣螂算法同样面临这一问题。本文将参考 Tanyildizi^[58]等人于 2017 年提出的黄金余弦启发式算法引申出的黄金余弦策略，即通过正弦函数代替原本算法进行迭代寻优，利用正弦函数和单位圆的关系，搜索到单位圆上所有的点，同时在算法位置更新中引入黄金分割数，减少解决方案的空间。黄金余弦优化策略在极大程度上提高了寻优算法的收敛速度的同时，又很好地平衡了“搜索”与“开发”，减少了寻优算法陷入局部最优情况的可能性，是一个非常强的寻优算法改进工具，黄金正弦数学模型如式(2-41)、式(2-42)和式(2-43)所示：

$$X_i^d(t+1) = X_i^d(t) |\sin(r_1)| + r_2 \sin(r_1) |(x_1 P^d(t) - x_2 X_i^d(t))| \quad (2-41)$$

$$x_1 = -\pi + 2\pi(1-\tau) \quad (2-42)$$

$$x_2 = -\pi + 2\pi\tau \quad (2-43)$$

式中： r_1 、 r_2 均为随机数，用于为模型解引入随机扰动，取值范围为(0, 2π)； x_1 、 x_2 为引入黄金分割数后的系数； $X_i^d(t)$ 为 d 维空间中第 i 个个体在第 t 次迭代

时的位置； $P^d(t)$ 为第 t 次迭代时全局最优位置； τ 为黄金分割数， $\tau = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$ 。

黄金正弦策略第一项的目的是在当前解的基础上进行正弦探索，第二项的目的是确保探索向当前全局最优解移动。为了进一步增强算法的全局搜索能力，特别是在处理复杂或多峰值优化问题时，本次研究在原始黄金正弦策略的基础上引入了第三项。该新增项的作用是确保探索过程在向全局最优解移动时，不会被当前全局最差解所吸引，从而帮助个体快速跳出不利区域，提升全局搜索效率。其数学模型如式(2-44)、式(2-45)和式(2-46)所示：

$$X_i^d(t+1) = X_i^d(t) |\sin(r_1)| + r_2 \sin(r_1) |x_1 P^d(t) - x_2 X_i^d(t)| \quad (2-44)$$

$$-r_3 \sin(r_1) |x_1 P^w(t) - x_2 X_i^d(t)|$$

$$x_1 = -\pi + 2\pi(1-\tau) \quad (2-45)$$

$$x_2 = -\pi + 2\pi\tau \quad (2-46)$$

式中： r_3 为新引入的随机数，用于为第三项引入随机扰动； $P^w(t)$ 为当前全局最差位置。

蜣螂算法中滚球蜣螂在没遇到障碍物的时候会跟随阳光进行位置更新，而遇到障碍物的时候会通过跳舞来进行位置更新，本次研究结合改进后的黄金正弦策略的优势与蜣螂跳舞时的位置更新公式对原始蜣螂算法进行改进，改进后的蜣螂在遇到障碍物后的位置更新数学公式如式(2-47)所示：

$$x_i(t+1) = x_i(t) \sin(r_1) + r_2 \sin(r_1) |x_1 X^b(t) - x_2 x_i(t)| \quad (2-47)$$

$$-r_3 \sin(r_1) |x_1 X^w(t) - x_2 x_i(t)|$$

蜣螂算法利用边界选择策略模拟蜣螂寻找最优产卵区繁育后代，这种办法给个体的位置更新加入了约束，因此可以通过引入“罚函数”对位置更新进行进一步约束，因此可以通过引入“罚函数”对位置更新进行进一步约束，即在模型的解靠近算法边界的时候，通过添加的罚函数触发“惩罚机制”。引入罚函数可以有效地处理繁育球位置更新的边界，避免下一位置的解过于靠近边界，提高算法的收敛速度。罚函数分为外部罚函数和内部罚函数，外部罚函数主要应用在算法探索前期，实现简单，允许部分超出界限的解存在，同时调整这些解的位置将其收束到约束范围内。内部罚函数主要应用于严格约束问题，不允许解进行边界外部探索，

并通过调整惩罚参数防止解过度靠近边界。本次研究结合蜣螂繁育球的更新思路，选择施加内部罚函数，加入 clip 函数防止解在靠近边界时出现惩罚数值过大，解不稳定的现象，其数学公式如式(2-48)、式(2-49)和式(2-50)所示：

$$P_i(t) = \mu(t) \cdot \text{clip} \left(\frac{1}{x_i(t) - Lb^*} + \frac{1}{x_i(t) - Ub^*}, -M, M \right) \quad (2-48)$$

$$\mu(t) = \frac{1}{1 + e^{-k_1(t-t_0)}} \quad (2-49)$$

$$M = k_2(Ub^* - Lb^*) \quad (2-50)$$

式中： $P_i(t)$ 为内部罚函数； $\mu(t)$ 为惩罚正参数用以控制惩罚强度；随着迭代次数的增加可以通过调整 μ 加大惩罚力度； k_1 为随机参数； k_2 为调节 clip 函数最值大小的参数。

添加内部罚函数后的繁育球更新公式如式(2-51)所示：

$$B_i(t+1) = X^* + b_1(B_i(t) - Lb^*) + b_2(B_i(t) - Ub^*) + P_i(t) \quad (2-51)$$

改进后的蜣螂算法的运行流程图如图 2-7 所示，展示了算法在各个阶段的工作原理和各个优化模块的协同作用。

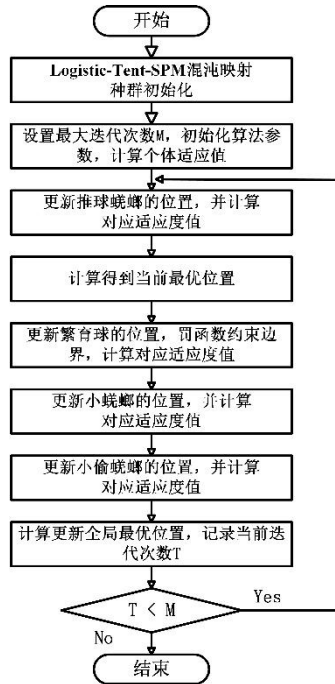
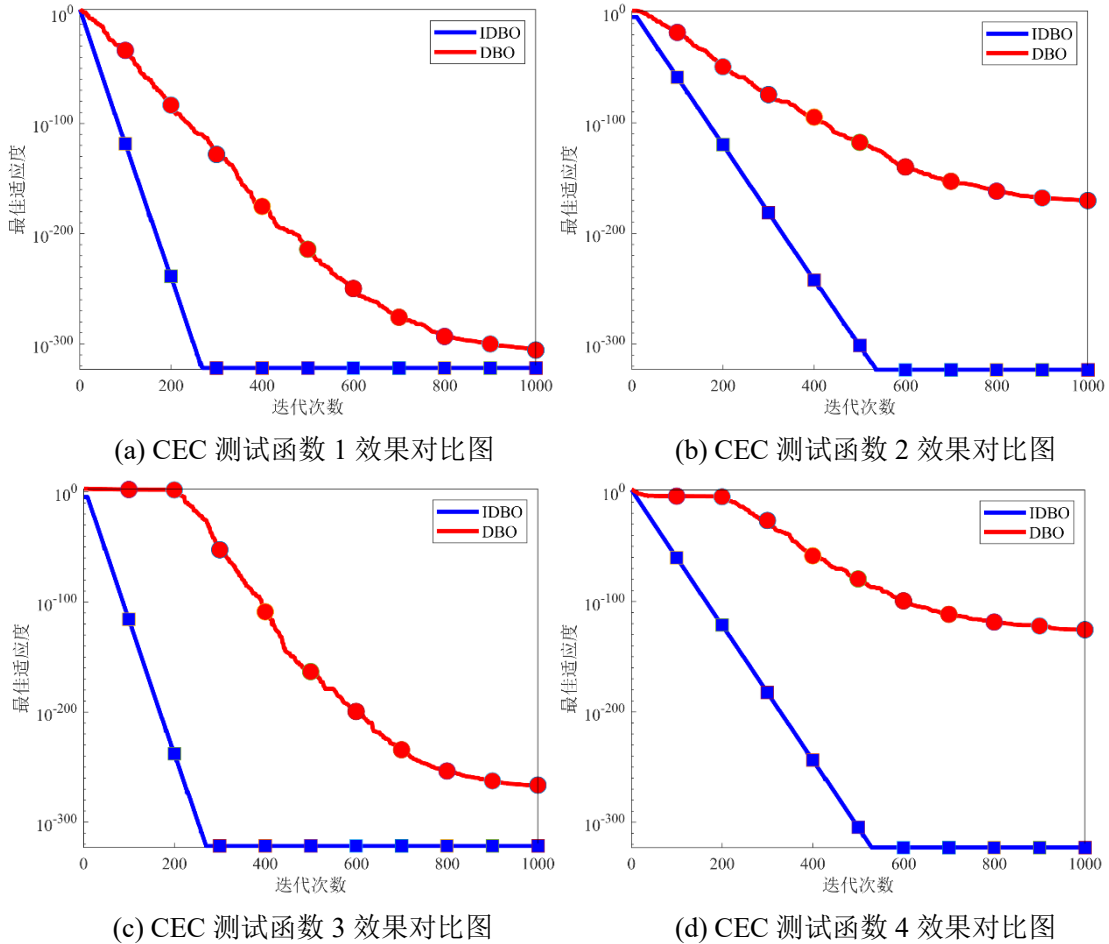


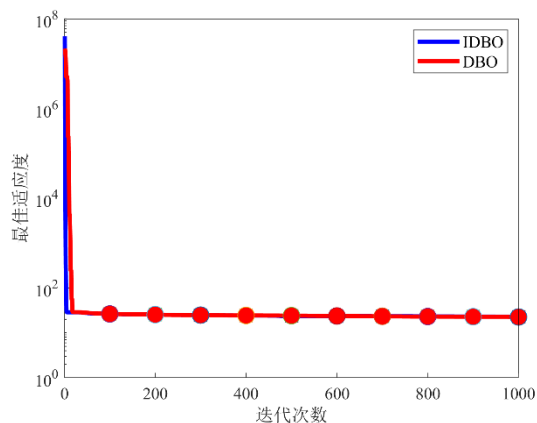
图 2-7 改进蜣螂算法 IDBO 流程图

利用测试函数(Congress on Evolutionary Computation, CEC)2014 对改进蜣螂算法 (Improved Dung Beetle Optimizer, IDBO) 的收敛性和全局搜索能力进行

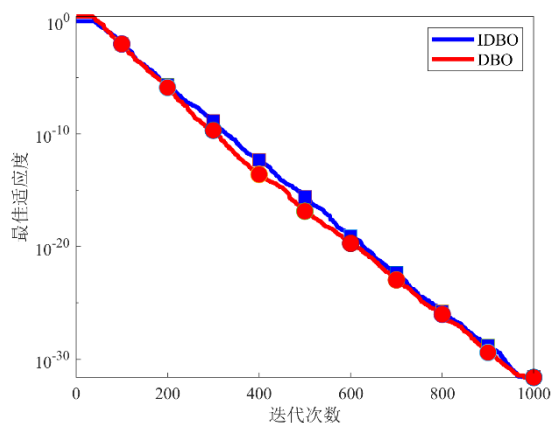
测试。这些测试函数被广泛应用于优化算法的性能评估，包括不同维度、不同复杂度的优化问题。通过对比改进蜣螂算法与其他经典优化算法（如麻雀算法 SSA、鲸鱼算法 WOA、灰狼算法 GWO 等）在 CEC 测试函数上的表现，可以清晰地评估改进蜣螂算法在收敛速度、全局搜索能力以及避免局部最优等方面的优势。本次实验硬件配置为 Intel Core i7-12700H CPU（20 线程）、16 GB DDR4-3200 内存、NVIDIA RTX 3050 Ti GPU（4 GB 显存），软件配置为 MATLAB R2019a(9.6.0) 学术版，编译器为 Microsoft Visual C++ 2017，蜣螂种群个数为 100，迭代次数为 1000 次，同一测试函数运行 10 次后取平均值，最终对比结果如图 2-8 所示。

由图 2-8 可知，改进后蜣螂算法在函数 1、函数 2、函数 3 和函数 4 的收敛测试中相比原始蜣螂算法有着更快的收敛速度。原始蜣螂算法在函数 2、函数 3、函数 4、函数 7 和函数 8 的收敛测试中，比改进后蜣螂算法更早陷入了局部最优解。综上，本文通过混沌映射、黄金正弦和惩罚函数改进的蜣螂算法具有更快的收敛速度和更大的搜索范围。

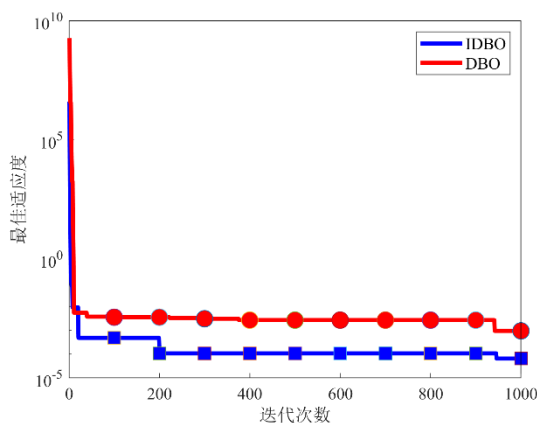




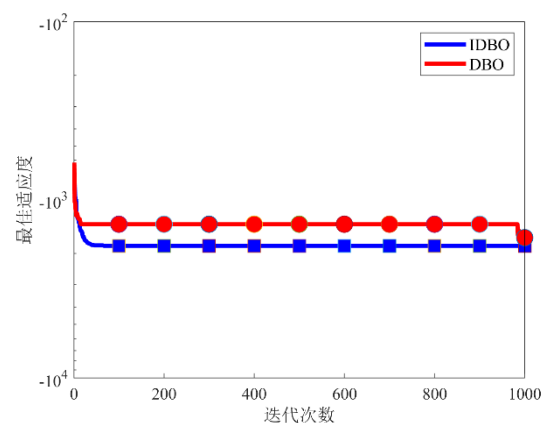
(e) CEC 测试函数 5 效果对比图



(f) CEC 测试函数 6 效果对比图



(g) CEC 测试函数 7 效果对比图



(h) CEC 测试函数 8 效果对比图

图 2-8 改进蜣螂算法(IDBO)与蜣螂算法(DBO)优化结果对比图

本研究将转向增益作为自变量，算法适应度函数设置为 2.3.2 节中定义的汽车操控稳定性指标，初始值参考李红娟^[59]给出的 3.7，迭代次数设置为 50 次，迭代结果如图 2-9 所示。

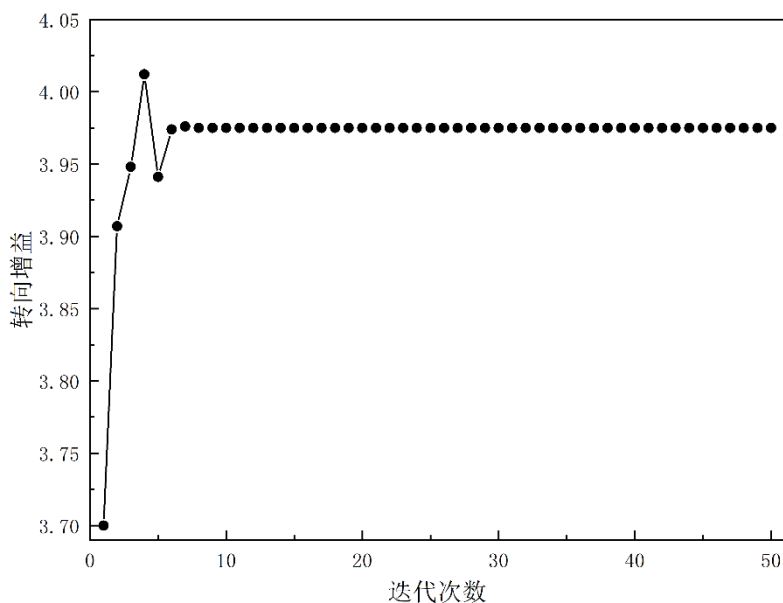


图 2-9 转向增益迭代图

由图 2-9 可知，第 1 次迭代到第 4 次迭代（迭代初期），转向增益迭代值从 3.70 跃升至 3.98。第 4 次迭代到第六次迭代（迭代中期），转向增益迭代值在 3.97 - 4.02 间窄幅震荡（标准差 < 0.015 ），表明算法已进入局部最优解区域。第 6 次迭代到第 50 次迭代（迭代后期）转向增益迭代值稳定在 3.975，为本次迭代最优解。

2.4 总结

本章通过对线控转向系统的结构和原理的分析，从方向盘总成和转向总成两个方面搭建了线控转向动力学模型。为了进一步提升模型的精确性，凸显线控转向的优势，对变传动比的取值方法进行了重新设计。首先从混沌映射初始化、黄金正弦搜索策略以及动态惩罚函数三个方面对传统蜣螂优化算法的收敛速度和搜索范围进行了改进，并进行了基于 CEC 测试函数的对比实验，实验结果证明改进后的蜣螂算法有效提高了算法并扩大了全局搜索范围。其次，引入了车辆稳定性指标对车辆的稳定性进行评判。最后，以车辆稳定性指标作为目标函数，利用改进后蜣螂算法对最佳转向增益进行在线迭代，计算出最佳传动比模型，使得所搭建的线控转向模型在低速情况下具有更轻盈的转向手感，高速下抑制过大、过于频繁的转向。

第3章 路感模拟系统的建模和优化

“路感”是指在车辆进行转向活动时，路面通过车轮施加给车辆的反作用力，经过机械连接传递回方向盘，产生的阻力矩。这个阻力矩不仅是驾驶员感知路面状态的重要信息来源，也是影响驾驶舒适性和安全性的关键因素。在传统的机械转向系统中，路感力矩主要依赖于方向盘与车轮之间的机械连接，除了回正力矩和摩擦力矩，路面粗糙度、车轮与地面之间的摩擦力、转向系统内部的摩擦力及惯性力等因素都会直接影响路感的强度。路面上的异物、油污等外界因素也会对路感产生不同程度的干扰，使得路感的形成和变化变得更加复杂。

本文采用动力学模型算法搭建路感力矩模型，并将摩擦力矩经验公式、魔术轮胎公式和无迹卡尔曼滤波引入模型进行修正。

3.1 路感力矩理论数学模型

“路感”指的是地面对转向轮的反作用力经过机械传动反馈到方向盘上，使驾驶员产生的驾驶“手感”，其中包括回正力矩和摩擦力矩。摩擦力矩包括转向时地面对车轮的摩擦力矩和方向盘的摩擦力矩。在机械传动中，摩擦一方面有利于系统的稳定性，过滤一些干扰，例如道路振动。另一方面作为负面影响会干扰驾驶员的操作，故本文忽略路面对车轮的摩擦，仅考虑方向盘的摩擦力矩^[60]。

车辆转向时产生的回正力矩，主要由车轮回正力矩和重力回正力矩组成。在计算方面，学者们已提出了多种经典的理论模型，其中德国汽车专家 Manfred Mitschke 所提出的 Mitschke 模型成为了最具影响力的模型之一，即从转向系统几何学方程、车辆动力学方程及车轮受力分析等角度出发进行分析和建模。

车轮受力分析如图 3-1 所示，结合转向方程式可易知，前轮转角如式(3-1)所示：

$$\theta = \frac{57.3L}{R} + \frac{Kv^2}{R} = \frac{57.3L}{R} + \left(\frac{W_{fs}}{C_{\alpha f}} - \frac{W_{rs}}{C_{\alpha r}} \right) \frac{v^2}{gR} \quad (3-1)$$

式中： v 为汽车行驶速度； L 为汽车轴距； R 是汽车转弯半径； K 为不足转向梯度； W_{fs} 、 W_{rs} 为车辆前后轴静载荷； $C_{\alpha f}$ 、 $C_{\alpha r}$ 为汽车前后轮侧偏刚度； g 为重力

加速度。

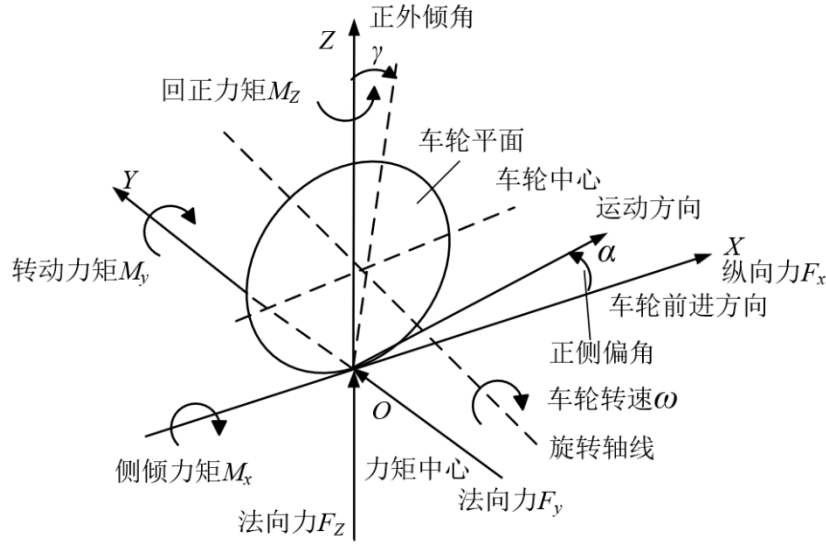


图 3-1 车轮受力分析图

汽车在转向时地面作用于车轮上的力由汽车前轴和后轴对车轮作用的力组成：

$$F_y = F_{yf} + F_{yr} = \frac{mv^2}{R} \quad (3-2)$$

式中： F_{yf} 、 F_{yr} 为汽车前、后轴作用在车轮上的侧向力； F_y 为地面作用在车轮上的侧向力。

对(3-1),(3-2)两式进行合并化简如式(3-3)所示：

$$F_y = \frac{mv^2 \theta}{57.3L + Kv^2} \quad (3-3)$$

车轮回正力矩可由轮胎拖距和后倾拖距计算如式(3-4)所示：

$$T_1 = F_y \times (\xi_1 + \xi_2) \quad (3-4)$$

式中： T_1 为轮胎回正力矩； ξ_1 为充气轮胎拖距； ξ_2 为主销后倾拖距。

主销后倾拖距(Caster Steering Drag)是主销后倾拖距是指主销轴线与地面交点与车轮中心与地面交点之间的距离，以保证车辆高速行驶下具备车轮回正的能力^[61]。充气轮胎拖距指轮胎在车辆运动过程中由于轮胎与路面之间的相对运动（滑移）所产生的力矩或者偏离行驶轨迹的现象^[62]。根据不同的场景，拖距有不同的定义和计算方法，但最常见的计算方法是基于轮胎侧向力和滑移角的关系，

如式(3-5)和式(3-6)所示：

$$\xi_1 = 0.5l = 0.5 \times 1.7 \sqrt{(D_0 - \Delta)\Delta} \quad (3-5)$$

$$\xi_2 = \lambda r \quad (3-6)$$

式中： D_0 为轮胎外径； Δ 为轮胎在垂直载下的径向变形量； λ 为前轮主销后倾角； r 为车轮半径。

对式(3-4)、式(3-5)和式(3-6)进行化简整理，可得车轮回正力矩计算公式如式(3-7)所示：

$$T_1 = \frac{mv^2\theta}{57.3L + Kv^2} \times (0.85\sqrt{(D_0 - \Delta)\Delta} + \lambda r) \quad (3-7)$$

重力回正力矩作为回正力矩的另一重要组成部分，主要来源于车辆姿态变化时重力对车轮施加的力矩，可以通过式(3-8)和式(3-9)进行计算，模拟车辆在不同工况下的驾驶反馈：

$$T_2 = \frac{QD \sin(2\beta) \sin(\theta)}{2} \quad (3-8)$$

$$Q = \frac{mgb}{2L} \quad (3-9)$$

式中： T_2 为重力回正转矩； Q 为前轮载荷； D 为主销内移量； β 为主销内倾角。

在方向盘总成中，除了路感电机提供的力矩外，最直接的力矩来源于方向盘内部。由于受到装配、材料等外部因素的影响，方向盘摩擦力矩的大小虽然不确定，但通常较小且可近似为常数，可以使用如下式(3-10)对方向盘摩擦力矩进行近似计算：

$$T_f = \frac{v}{80} T \quad (3-10)$$

根据车轮回正力矩和重力力矩计算路感模拟回正力矩，再结合传动比和方向盘摩擦力矩就可以得到施加在方向盘上的期望路感力矩。为了获得更好的驾驶体验，传动比会随着车速的变化而改变，本次理想力矩模型的建立将输入动态变化的传动比，以更好地模拟机械传动时驾驶员的“手感”，如式(3-11)所示：

$$T = \frac{T_1 + T_2}{i} + T_f \quad (3-11)$$

式中： T 为路感力矩； i 为转向传动比； T_f 为方向盘摩擦力矩。

3.2 基于 Carsim 和魔术轮胎公式的优化策略

在 3.1 节中给出了路感力矩的计算模型，并介绍了侧向力的计算方法。该计算方法通过式(3-3)提供了一个粗略的估算，为了进一步提升模型的精度，本节将在前述计算基础上，引入荷兰著名学者 Pacejka 教授提出的魔术轮胎模型(Magic Tire Model)，对现有的路感力矩计算模型进行优化，以更好地模拟实际驾驶过程中车辆与路面之间的相互作用^[63]。

魔术轮胎模型作为车辆动力学中广泛应用的经典模型，由荷兰教授 Hans B. Pacejka 于 20 世纪 80 年代提出。这个模型通过一系列经验公式，能够更加精准地描述轮胎在不同侧向力作用下的动态响应，特别是在高侧向力和大滑移角的情况下，能够有效捕捉轮胎与地面接触的非线性特征，进而为车辆动力学模型提供更为可靠的支持。

魔术轮胎模型的数学表达式如式(3-12)所示，其中考虑了多个因素对侧向力的影响，具体的输入输出对应关系则如图 3-2 所示。

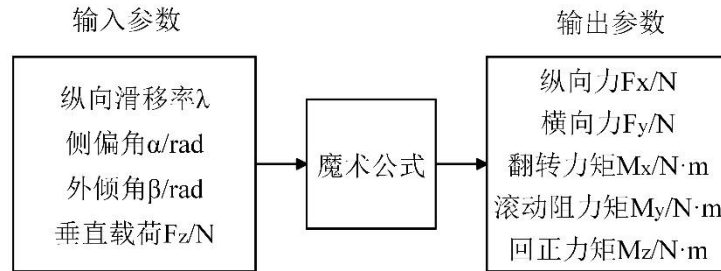


图 3-2 魔术公式输入输出参数图

$$F_y = D \times \sin \left(C \times \arctan \left(B \times \alpha - E \left(B \times \alpha - \arctan(B \times \alpha) \right) \right) \right) \quad (3-12)$$

式中： F_y 为车轮所受到的侧向力； α 为滑移角即轮胎的角度与轮胎轨迹方向之间的夹角； B 为轮胎横向刚度因子； C 为形状因子； D 为轮胎最大侧向力； E 为滞后因子。

参数 B 控制轮胎的横向刚度，并决定了轮胎在不同滑移角下的响应速度，对于普通乘用车轮胎， B 值通常较小，参考范围为 5 至 10。参数 C 影响轮胎侧向力曲线的形状，决定了轮胎的非线性程度，较大的 C 值使轮胎更快达到最大侧向力，常见的取值范围为 1.0 至 2.0。参数 D 表示轮胎在最大滑移角时可提供的最大侧向力，受轮胎负载、胎压、材料等因素影响，普通乘用车的参考值大约在

3000 N 至 5000 N 之间。参数 E 用于描述轮胎的滞后效应，影响轮胎达到最大侧向力后力的下降速度，主要表现为轮胎在大滑移角下的迟滞现象，常见取值为 0.2 至 0.4。

本文选取的汽车模型为 Audi A8，搭配的轮胎型号为 255/60 R18，其相关参数如图 3-3 所示，包括参考垂直力 8000 N、有效滚动半径 353 mm、空载半径 358 mm 和弹簧刚度 278 N/mm 等。

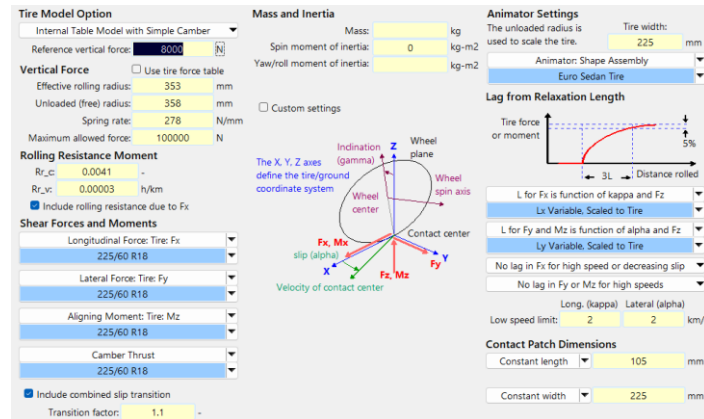


图 3-3 Carsim 轮胎参数设置图

Carsim 中不同载荷下侧向力与侧偏角的关系如图 3-4 所示。该图展示了在不同垂直载荷下，轮胎的侧向力(F_y)与侧偏角(α)之间的变化规律。可以看出，随着侧偏角的增大，侧向力呈现出明显的非线性增长，且在达到最大侧向力时，曲线出现饱和现象。此外，在不同载荷条件下，侧向力的变化趋势有所不同。

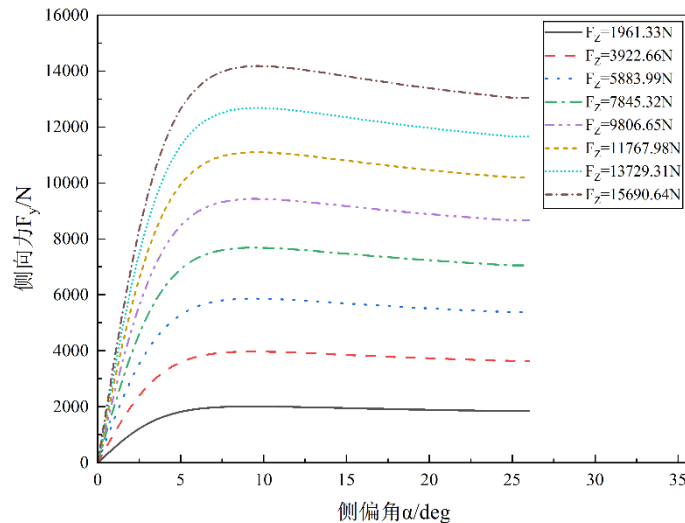


图 3-4 侧向力变化图

基于 Carsim 软件建立车辆仿真模型，采用稳态滚动假设并忽略动态响应延迟，同时设定接地压力均匀分布且不考虑胎面花纹影响。模型将纵向和侧向特性

独立处理，并假设垂向载荷与轮胎力呈线性关系，且不考虑温度、磨损及路面变化因素。该模型可在预设工况下准确获取轮胎侧向力、垂直载荷及侧倾角等关键动力学参数。随后，利用 Matlab 中的曲线拟合工具箱(Curve Fitting Toolbox, CFT)对仿真数据进行处理，通过拟合分析得到魔术轮胎公式(Magic Formula, MF)中的关键参数 B 、 C 、 D 、 E 在不同垂直载荷下的数值变化规律。这些参数分别代表了轮胎的刚度因子、形状因子、峰值因子以及曲率因子，其变化规律能够反映轮胎在不同载荷条件下的力学特性。表 3-1 中详细列出了不同垂直载荷条件下参数 B 、 C 、 D 、 E 的具体数值。

表 3-1 魔术轮胎公式参数表

垂直载荷/ N	参数 B	参数 C	参数 D	参数 E
1961.33	0.1952	1.413	2016	-0.2852
3922.66	0.1942	1.413	3975	-0.2853
5883.99	0.1932	1.413	5868	-0.2854
7845.32	0.192	1.413	7689	-0.2855
9806.65	0.1908	1.413	9434	-0.2856
11767.98	0.1896	1.413	11000	-0.2857
13729.31	0.1883	1.413	12680	-0.2859
15690.64	0.187	1.413	14180	-0.286

对表 3-1 的数据进行拟合，各参数随垂直载荷变化的关系如式(3-13)、式(3-14)、式(3-15)和式(3-16)：

$$f_B(x) = -6.003 \times 10^{-7}x + 0.1966 \quad (3-13)$$

$$f_C(x) = 1.413 \quad (3-14)$$

$$f_D(x) = 0.8851x + 543.8 \quad (3-15)$$

$$f_E(x) = -5.827 \times 10^{-8}x - 0.2851 \quad (3-16)$$

其中参数 B 、 D 、 E 的拟合精度分别为 0.9978、0.9981 和 0.9884。结合式(3-12)和式(3-13)可以得到轮胎 255/60 R18 在不同垂直载荷下侧偏角与侧向力的关

系。

3.3 基于无迹卡尔曼滤波的路感优化策略

由于线控转向系统依赖电机来模拟路感力矩，而在复杂路况下，路感信号的稳定性可能受到多种因素的干扰，导致电机转矩输出出现偏差，影响系统的整体控制精度。主要影响因素包括以下几方面：

(1)传感器噪声影响：扭矩传感器、方向盘转角传感器等测量装置在采集数据时，可能受到电子噪声、环境温度变化及信号干扰的影响，从而导致测量误差。

(2)道路状况变化：由于不同路面（如柏油路、混凝土路、砂石路等）对轮胎的附着力不同，转向系统的反馈也会有所差异。例如，在光滑路面上，转向力矩较小，而在坑洼或碎石路段，突发的颠簸可能导致力矩的瞬时波动，增加驾驶员的操控负担。

(3)个性化驾驶需求：每位驾驶员的驾驶风格和对路感的偏好各不相同。一些驾驶员偏好灵敏的转向反馈，以便更快速地感知道路状况，而另一些驾驶员则倾向于更加平稳、舒适的转向体验。

为了解决上述问题，本文引入无迹卡尔曼滤波器(Unscented Kalman Filter, UKF)，对传感器数据进行动态估计与优化，过滤噪声，以提高路感力矩模拟的平滑度。

3.3.1 状态空间模型

要利用无迹卡尔曼滤波对路感模型进行优化，首先需要将模型转化为状态空间形式，并确定系统的状态变量、观测变量以及过程噪声和观测噪声。而状态变量是描述系统动态行为的关键参数。根据模型，可以选择以下变量作为状态变量：

$$f(X) = \begin{bmatrix} \theta \\ v \\ T_1 \\ T_2 \\ T_f \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

式中： X 为状态变量； θ 为前轮转角； v 为车辆纵向车速； T_1 表示车轮回正力矩；

T_2 表示重力回正力矩； T_f 为方向盘摩擦力矩。

其中，观测变量是通过传感器或其他测量手段直接或间接获取的系统输出。根据模型，可以选择以下变量作为观测变量：

$$Z = \begin{bmatrix} F_y \\ T \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

式中： Z 为观测变量； F_y 为地面作用在车轮上的侧向力； T 方向盘上的期望路感力矩。

3.3.2 过程模型

过程模型可以描述 3.3.1 中状态变量随时间演化的规律。结合 3.1 中公式可以得到各状态变量的演化方程。

(1)前轮转角 θ

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta t \dot{\theta}_k \quad (3-19)$$

式中： θ_k 为第 k 个时间步的前轮转角； θ_{k+1} 为第 $k+1$ 个时间步的前轮转角； Δt 为时间步长； $\dot{\theta}_k$ 为前轮转角的变化率，对式(3-1)两边对 t 求导可得，如式(3-20)所示。

$$\dot{\theta} = \frac{d}{dt} \left(\frac{57.3L}{R} + \frac{Kv^2}{R} \right) = \frac{K(2v\dot{v})}{R} \quad (3-20)$$

(2)车辆速度

$$v_{k+1} = v_k + \Delta t \dot{v}_k \quad (3-21)$$

式中： v_k 为第 k 个时间步的车速； v_{k+1} 为第 $k+1$ 个时间步的车速； $\dot{v}_k$ 为车辆加速度。

(3)车轮回正力矩 T_1

$$T_{1,k+1} = T_{1,k} + \Delta t \dot{T}_{1,k} \quad (3-22)$$

式中： $T_{1,k}$ 为第 k 个时间步的车轮回正力矩； $T_{1,k+1}$ 为第 $k+1$ 个时间步的车轮回正力矩； $\dot{T}_{1,k}$ 为 $T_{1,k}$ 的导数，可以由式(3-7)两边对 t 求导，如式(3-23)所示。

$$\begin{aligned}\dot{T}_1 &= \frac{d}{dt} \left(\frac{mv^2\theta}{57.3L + Kv^2} \times (0.85\sqrt{(D_0 - \Delta)\Delta} + \lambda r) \right) \\ &= \frac{2m\theta v\dot{v}(57.3L + Kv^2) - mv^2\theta(2Kv\dot{v})}{(57.3L + Kv^2)^2} \times (0.85\sqrt{(D_0 - \Delta)\Delta} + \lambda r)\end{aligned}\quad (3-23)$$

(4)重力回正力矩 T_2

$$T_{2,k+1} = T_{2,k} + \Delta t \dot{T}_{2,k} \quad (3-24)$$

式中： $T_{2,k}$ 为第 k 个时间步的重力回正力矩； $T_{2,k+1}$ 为第 $k+1$ 个时间步的重力回正力矩； $\dot{T}_{2,k}$ 为 $T_{2,k}$ 的导数，可以由式(3-8)和(3-9)两边对 t 求导，如式(3-25)所示。

$$\dot{T}_2 = \frac{d}{dt} \left(\frac{QD \sin(2\beta) \sin(\theta)}{2} \right) = \frac{QD \sin(2\beta)}{2} \cos(\theta) \dot{\theta} \quad (3-25)$$

(5)方向盘摩擦力矩 T_f

$$T_{f,k+1} = T_{f,k} + \Delta t \dot{T}_{f,k} \quad (3-26)$$

式中： $T_{f,k}$ 为第 k 个时间步的重力回正力矩； $T_{f,k+1}$ 为第 $k+1$ 个时间步的重力回正力矩； $\dot{T}_{f,k}$ 为 $T_{f,k}$ 的导数。

路感力矩受驾驶员输入、路面反馈及传感器噪声影响，可将其建模为状态空间方程：

$$X_k = AX_{k-1} + BU_k + W_k \quad (3-27)$$

式中： X_k 表示系统状态，本次研究选取路感力矩 T_k 作为状态变量，即 $X_k = T_k$ ； U_k 为输入变量，通常包含如方向盘角速度、车速等影响因素； W_k 为过程噪声，满足高斯分布 $W_k \sim N(0, Q)$ ，用于建模外部不确定性因素； A 为状态转移矩阵，描述力矩的动态变化； B 为控制输入矩阵。

观测模型描述了如何从状态变量中推导出观测变量。其中，观测变量 F_y 由 3.2 小节给出，观测变量 T 由式(3-23)和式(3-25)给出。

3.3.3 无迹卡尔曼滤波

在 UKF 开始阶段，需要对状态估计 x_0 （初始时刻的状态向量）和协方差矩阵 P_0 （初始时刻状态估计的不确定性）进行初始化。并根据当前状态均值和协方差矩阵生成一组 sigma 点，如式(3-28)和式(3-29)所示：

$$\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} \sigma_\theta^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_v^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{T_1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{T_2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{T_f}^2 \end{bmatrix} \quad (3-28)$$

$$X_0 = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ v_0 \\ T_{1,0} \\ T_{2,0} \\ T_{f,0} \end{bmatrix} \quad (3-29)$$

对于 n 维状态向量，生成 $2n+1$ 个 Sigma 点：

$$X_0 = \hat{X}_k \quad (3-30)$$

$$X_0 = \hat{X}_k + \left(\sqrt{(n+\lambda)P_k} \right)_i, \quad i=1, \dots, n \quad (3-31)$$

$$X_0 = \hat{X}_k - \left(\sqrt{(n+\lambda)P_k} \right)_i, \quad i=n+1, \dots, 2n \quad (3-32)$$

式中： λ 为缩放因子，且 $\lambda = \alpha^2(n+\delta) - n$ ； α 和 δ 均为决定 λ 的调节参数。

通过过程模型对每个 Sigma 点进行预测：

$$Z_{i,k+l|k} = h(X_{i,k+l|k}) \quad (3-33)$$

由此可计算出观测均值和协方差：

$$\hat{Z}_{i,k+l|k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} Z_{i,k+l|k} \quad (3-34)$$

$$P_{ZZ} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \left(Z_{i,k+l|k} - \hat{Z}_{i,k+l|k} \right) \left(Z_{i,k+l|k} - \hat{Z}_{i,k+l|k} \right)^T + R_k \quad (3-35)$$

$$P_{XZ} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \left(X_{i,k+l|k} - \hat{X}_{i,k+l|k} \right) \left(Z_{i,k+l|k} - \hat{Z}_{i,k+l|k} \right)^T \quad (3-36)$$

计算卡尔曼增益：

$$K = P_{XZ} P_{ZZ}^{-1} \quad (3-37)$$

更新状态估计和协方差：

$$\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_{k+1|k} + K \left(Z_{i,k+1|k} - \hat{Z}_{i,k+1|k} \right) \quad (3-38)$$

$$P_{k+1} = P_{k+1|k} - K P_{ZZ} K^T \quad (3-39)$$

3.3.4 基于群智能算法的无迹卡尔曼滤波优化

无迹卡尔曼滤波的优化目标是找到状态估计误差最小的调节参数集合 α 和 δ 。本次仿真将调节参数 α 和 δ 作为目标优化参数，观测变量 F_y 和 T 作为代价函数，在 Matlab/Simulink 中设置端口，利用 Prescan 和 Matlab/Simulink 进行联合仿真，并将 40 s 内的观测变量取平均值输出到 Matlab 工作区，最后用群智能算法调度工作区数据计算最优调节参数，时间步长与 Matlab/Simulink 模型设置一致为 40 s，迭代次数设置为 100。重复进行实验，设计优化后蜣螂算法(IDBO)、麻雀算法(SSA)、鲸鱼算法(WOA)、粒子群算法(PSO)进行迭代效果对照实验，四种群智能算法迭代调节函数 α 和调节函数 δ 的结果如图 3-5 和图 3-6 所示。

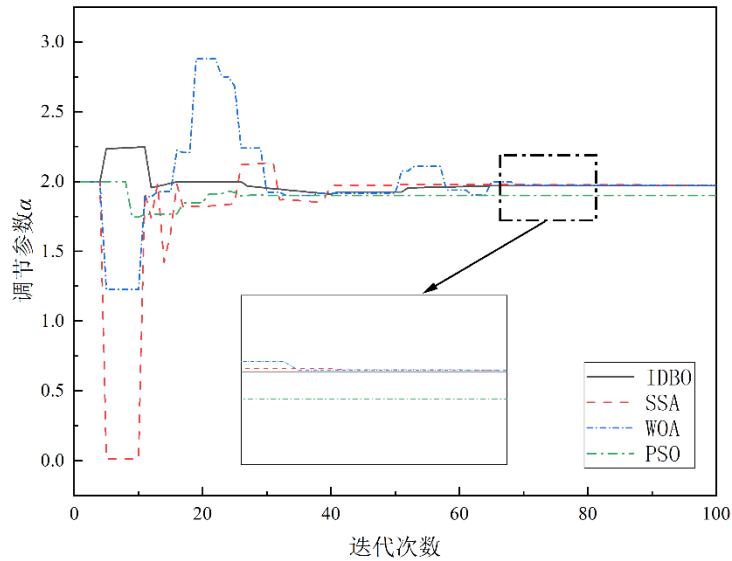


图 3-5 调节函数 α 迭代图

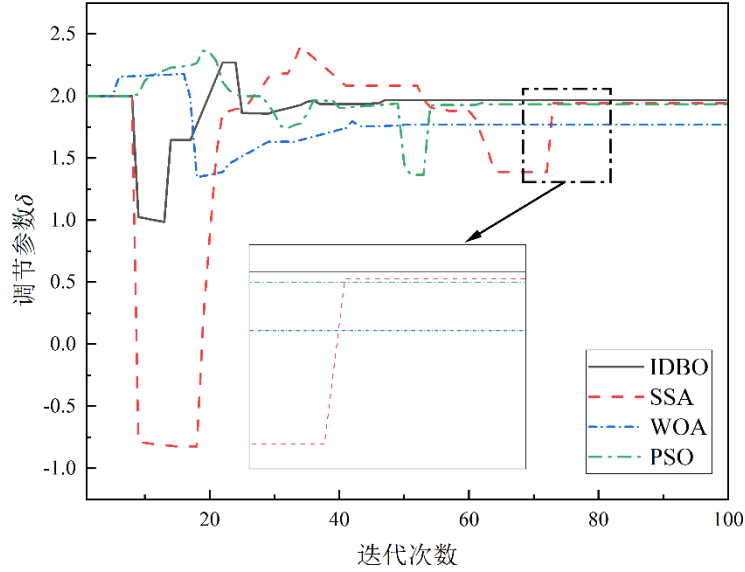


图 3-6 调节参数 δ 迭代图

由图 3-5 可知, PSO 算法在迭代 31 次后陷入了局部最优解为 1.90064, SSA、WOA 和 IDBO 算法分别迭代 73 次、63 次和 47 次后得到最优解, 且结果基本一致, 为 1.97533、1.97457、1.97396。IDBO 的迭代速度高于 SSA 和 WOA。由图 3-6 可知, WOA 算法在迭代 53 次后陷入了局部最优解为 1.76969, SSA、PSO 和 IDBO 分别迭代 90 次、31 次和 65 次后得到最优解, 分别为 1.95533、1.93256 和 1.96956, 结果基本一致。IDBO 迭代速度高于 SSA, 低于 PSO。

综上, IDBO 算法在本次调节函数 α 和调节函数 δ 最优解迭代实验中, 收敛速度和搜索范围综合迭代效果优于 SSA、WOA 和 IDBO 算法。调节函数 α 的最优解为 1.97, 调节函数 δ 的最优解为 1.95。

3.4 总结

本章通过对车轮回正力矩和重力回正力矩的分析, 建立了路感力矩的计算模型框架, 并利用方向盘摩擦力矩经验公式对模型框架进行修正, 提高精确性。引入魔术轮胎模型, 利用 Carsim 和 Matlab 工具拟合了不同载荷下, 车轮侧向力和侧偏角的函数关系, 替换前文的车轮侧向力经验公式, 进一步提升精确性。最后利用改进蜣螂算法对无迹卡尔曼滤波的调节函数 α 、 δ 进行重新取值, 以此过滤传感器采集数据的噪声, 提高模型输出结果的平滑性, 同时也验证了所改进的蜣螂算法在复数自变量的迭代案例下相比同类型算法有着更大的优势。

第4章 路感电机控制策略研究

车辆在行驶过程中会遇到诸多复杂的情况，如风雪、沙城暴、电磁干扰、暴雨等，因此车辆上所搭载的电机在接到整车控制器 VCU 所发送的信号后，往往难以准确地表达出来，所以我们需要建立合适的控制策略，提高电机在这些复杂环境下的鲁棒性，减少输出误差。最常见的控制策略为 PID 控制策略，由于其简单的结构（比例增益、积分增益、微分增益）适用在不同的工业场合，但也正因为 PID 控制策略的结构简单，导致其面对非线性的复杂环境时，表现出来的控制效果较差。基于控制系统的状态方程建立的 SMC 控制策略，面对复杂环境时候表现出来了较高的鲁棒性，但是在逼近滑模面的时候会出现严重的抖动现象，无法直接应用到实际系统中。结合以上的原因，本章将建立新的控制策略，从转向系统输出误差和电机电流控制等角度出发，优化路感电机的鲁棒性。

4.1 基于方向盘动力学模型的 SMC 策略

滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)又叫变结构控制，与常规控制区别在于控制的不连续性，能根据位置切换函数。相较于 PID 控制策略的线性控制，在复杂的环境中进行非线性控制，可以结合对象的状态方程进行控制器“u”的设计，具有较高的鲁棒性和稳定性。但是在接近滑模面（期望值与实际值之差为零）的时候，会出现“抖动”现象，即在滑模面附近频繁快速穿插，为了解决该问题可以对 SMC 的控制律进行优化，利用控制的不连续性特点使函数远离滑模面的时候加快趋近速率，靠近滑模面时放缓趋近速率^[64]。

为使 SMC 在远离滑模面的位置快速趋近在靠近滑模面的位置切换函数，放慢趋近速度，减小在滑模面附近的抖动现象，本次研究将对 SMC 的趋近律进行优化。传统的 SMC 趋近律如式(4-1)所示：

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sign}(s) - ks \quad (4-1)$$

式中： s 为滑模变量(Sliding Variable)， $\dot{s}$ 为 s 的时间导数， ε 为抖动参数。

对 ε 抖动参数进行优化，如式(4-2)和式(4-3)所示：

$$\dot{s} = -\varepsilon_1 \text{sign}(s) - ks \quad (4-2)$$

$$\varepsilon_1 = \begin{cases} 10e & , e \geq 1 \\ 10e^3 & , 0.01 < e < 1 \\ 0.01e & , e \leq 0.01 \end{cases} \quad (4-3)$$

式中： e 为期望值与实际值的误差； k 为随机参数。

将路感电机的理想转角 θ_r 作为输入，实际转角 θ_a 作为输出，路感电机的转矩作为控制变量，建立二阶线性状态方程，如式(4-4)所示：

$$T_m = J_m \ddot{\theta}_a + B_m \dot{\theta}_a + u_{SMC} \quad (4-4)$$

式中： θ_r 为路感电机理想转角， θ_a 为路感电机实际转角， u_{SMC} 为 SMC 控制器

建立滑模面 $s = ce + \dot{e}$ ；其中误差 $e = \theta_r - \theta_a$ ； $\dot{e} = \dot{\theta}_r - \dot{\theta}_a$ ；带入趋近律公式可得：

$$\ddot{\theta}_a = \ddot{\theta}_r + c(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_a) + \varepsilon_1(\theta_r - \theta_a)^2 \text{sign}(s) + ks \quad (4-5)$$

式中： c 为随机参数。

将趋近律公式(4-4)带入二阶状态方程(4-5)可得控制器如式(4-6)所示：

$$u_{SMC} = T_m - J_m (\ddot{\theta}_r + c(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_a) + \varepsilon_1 e^2 \text{sign}(s) + ks) - B_m \dot{\theta}_a \quad (4-6)$$

利用李雅普诺夫函数验证系统的稳定性，公式为 $V = \frac{1}{2}s^2$ ，根据 Lyapunov 判据，当 $\dot{V} = \dot{s}s < 0$ 成立时，系统稳定。将式(4-7)带入 $s = ce + \dot{e}$ ， $\dot{s} = c\dot{e} + \ddot{e}$ 中，计算 $\dot{V} = \dot{s}s$ 可得：

$$\dot{s}s = -\varepsilon_1 e^2 |s| - k |s| < 0 \quad (4-7)$$

由此可知本次设计的 SMC 控制律符合 Lyapunov 判据，是一个稳定的系统。

4.2 基于方向盘动力学模型的 LQR 策略

线性二次调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)同样是一种广泛应用的控制策略，其基本原理是通过最小化一个代价函数（通常为系统状态和控制输入的加权平方和）来获得最优的控制律。该方法能够保证系统在给定约束条件下达到最优性能。Kwakernaak^[65]在其研究中指出，LQR 能够实现高效的控制性能和较低的能量消耗，因此广泛应用在自动控制和飞行控制等领域。Anderson^[66]进一步

提出求解代数黎卡提方程(Algebraic Riccati Equation, ARE) 找到最优状态反馈控制律,使得系统的性能指标达到最小。LQR 的计算复杂度较低,适合实时控制系统,能够减少计算负担并提高响应速度,通过调整权重矩阵,还可以灵活地优化系统的状态反馈和控制输入,进一步提高系统的动态性能与稳态精度。

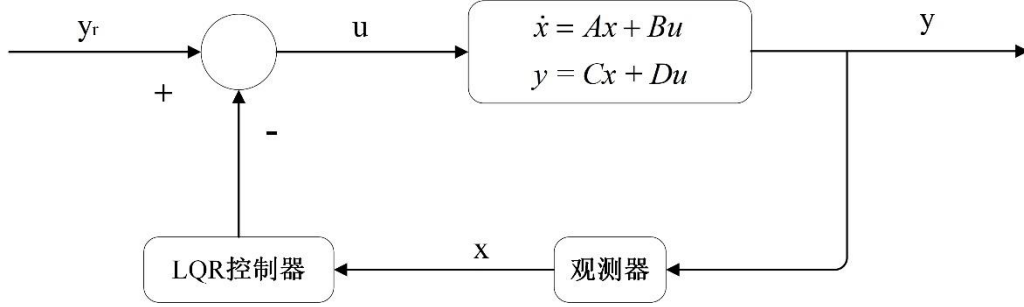


图 4-1 LQR 控制策略原理图

对于线控转向系统中的路感电机进行 LQR 控制时,可以通过构建路感电机的状态空间模型来实现优化控制。转向系统的状态方程如式(4-8)所示:

$$T_m = J_m \ddot{\theta}_a + B_m \dot{\theta}_a + \dot{u}_{LQR} \quad (4-8)$$

可以将该二阶微分方程转化为状态空间形式。首先定义状态变量 x_1 为角度, x_2 为角速度:

$$x_1 = \theta_a \quad (4-9)$$

$$x_2 = \dot{\theta}_a \quad (4-10)$$

则系统的状态向量如式(4-11)所示:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_a \\ \dot{\theta}_a \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

将方程转化为状态方程,首先由式(4-8)可知 $x_2 = \dot{x}_1$, 再对 $T_m = J_m \ddot{\theta}_a + B_m \dot{\theta}_a + \dot{u}_{LQR}$ 进行求解可以得到:

$$\dot{x}_2 = \ddot{\theta}_a = \frac{1}{J_m} (T_m - B_m \dot{\theta}_a - \dot{u}) \quad (4-12)$$

将式(4-12)改写成状态空间形式如式(4-13)所示:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_m} \end{bmatrix} \dot{u} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \end{bmatrix} T_m \quad (4-13)$$

简化后如式(4-14)所示：

$$\dot{x} = Ax + Bu + FT_m \quad (4-14)$$

式中： $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_m} \end{bmatrix}$, $F = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \end{bmatrix}$ 。

LQR 控制的目的是通过最小化以下代价函数 J 来找到最优控制输入：

$$J = \int_0^\infty (x^T Qx + \dot{u}^T Ru) dt \quad (4-15)$$

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & q_2 \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

$$R = r \quad (4-17)$$

式中：其中 Q 是状态加权矩阵； R 是控制加权矩阵；通过调整参数 q_1 、 q_2 、 r 选择合适的 Q 和 R 。

在 LQR 控制中，惩罚系数 q_1 和 q_2 分别表示对路感电机转角和角加速度误差的惩罚程度。通过 q_1 和 q_2 控制转角误差的惩罚，决定了系统的精度要求，较大的 q_1 值会提高系统对转角精度的关注；而 q_2 控制角加速度误差的惩罚，影响系统的响应速度，较大的 q_2 值会提升系统对角速度变化的响应。通过合理调整这两个惩罚系数，可以在精度和动态响应之间找到合适的平衡。控制输入的权重 r 调节了控制输入的大小。增加 r 值将限制控制输入，从而避免过大的转矩，适合对能量消耗或避免剧烈响应有要求的系统。减小 r 值则使控制器产生更大的控制信号，以实现更快速的响应，适用于对快速跟踪有较高要求的系统。

最优控制律 $\dot{u} = -Kx$ 中的增益矩阵 K 定义了反馈控制律，使得系统在设定的约束下实现最优性能。对于 LQR 问题，最优增益矩阵 K 可以通过解代数黎卡提方程（ARE）来计算，从而获得一组最优的控制增益，确保系统能够在精度与响应速度的要求下实现最优控制。

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (4-18)$$

式中： P 为满足代数黎卡提方程的对称正定矩阵。

利用 Matlab 软件对代数黎卡提方程进行求解,输出初始值 $q_1=10, q_2=1, r=1$, 可以得到 P 矩阵为 $\begin{bmatrix} 8.5642 & 3.1623 \\ 3.1623 & 2.6082 \end{bmatrix}$, 最优增益矩阵 K 为 $[3.1623 \quad 2.6082]$ 。则控制器输出 u_{LQR} 如式(4-15)所示:

$$u_{LQR} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = (A - BK)x + FT_m \quad (4-19)$$

利用改进后蜣螂算法(IDBO)、虚拟实验工况模型和 LQR 控制策略可以通过不断迭代角度惩罚参数 q_1 、角速度惩罚参数 q_2 和输入加权参数 r 以确保在实际应用中,系统能够以最佳的方式平衡转角精度、角速度响应速度与控制输入的能量消耗,实现精确的路感电机误差修正。

4.3 基于 SMC 和 LQR 的融合控制策略

SMC 具有较高的鲁棒性,能够有效应对系统内部的不确定因素和外部扰动,特别适合处理车辆行驶过程中复杂多变的环境。在路感反馈系统中,SMC 能够保障系统的稳定性和快速响应。然而,当误差减小至一定范围时,滑模面附近高频的正负信号切换可能给硬件带来极大的负担,最终导致输出信号震荡,呈现出“抖动”的现象。尽管在 4.1 小节中通过优化 SMC 的趋近律减轻了这种抖动,但无法彻底根除这种影响,因此,SMC 更多用于仿真模拟和理论研究,在实际生产中,由于其对驾驶员驾驶体验可能造成较大负面影响,应用范围相对有限。

4.2 小节中介绍了 LQR 策略,这种控制策略的最大优势在于误差精度和响应速度可调节性,SMC-LQR 混合电机控制策略将利用 SMC 的高鲁棒性快速达到滑模面附近,然后切换 LQR 策略,提高控制精度,减小响应速度,既能保证系统面对不确定因素的高鲁棒性,又能通过降低反应速度提高稳定状态下驾驶员的操作手感。SMC-LQR 控制策略的关键就是切换机制,使得两种控制策略能够平滑过渡,避免控制策略切换时产生突变或不稳定的情况。

4.3.1 SMC-LQR 融合策略设计

4.1 小节和 4.2 小节分别设计了基于路感反馈系统动力学方程的 SMC 控制器

和 LQR 控制器，本小节通过设置一个动态权重因子 α_t 融合两个控制器，新控制器的公式为：

$$u = \alpha_e u_{SMP} + (1 - \alpha_e) u_{LQR} \quad (4-20)$$

式中： u 为 SMC-LQR 混合控制策略； α_e 为影响 u_{SMP} 和 u_{LQR} 权重且随误差动态变化的因子，范围为(0, 1)。

为了使得融合控制策略在切换时得以平滑过渡，基于动态因子 α_t 如下公式描述，变化曲线如图 4-2 所示。

$$f(x) = \begin{cases} 1, & e < e_{start} \\ \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\pi \frac{e_{end} - e}{e_{end} - e_{start}} \right) \right), & e_{start} < e < e_{end} \\ 0, & e > e_{end} \end{cases} \quad (4-21)$$

式中： e 为当前误差； e_{start} 为定义的策略切换开始误差； e_{end} 为定义的策略切换结束误差，决定了混合控制策略何时由 SMC 控制器向 LQR 控制器切换。

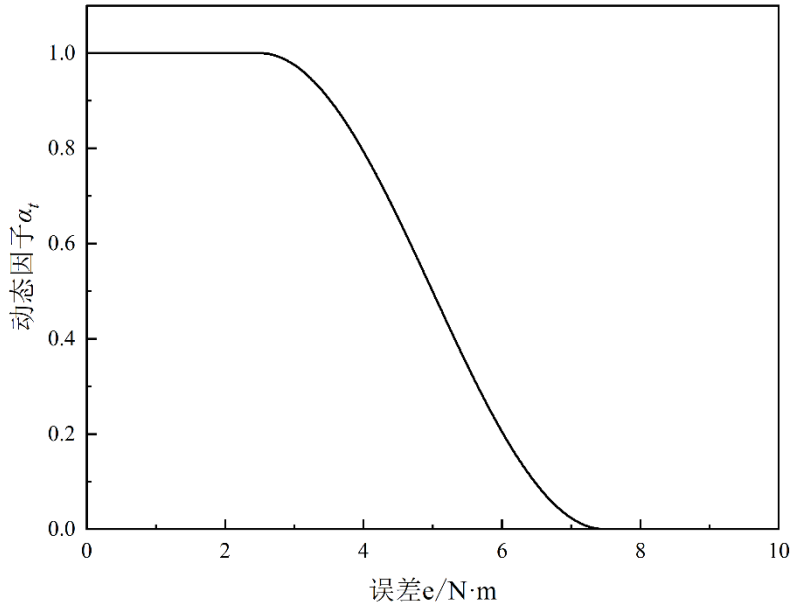


图 4-2 动态因子 α_e 变化曲线图

如式(4-21)所示，当 e 处于 $(0, e_{start})$ 区间内，融合控制策略完全由 SMC 控制决定，当 e 处于 (e_{start}, e_{end}) 区间内，融合控制策略将由 SMC 控制转向 LQR 控制，当 e 处于 $(e_{end}, +\infty)$ 区间内，融合控制策略完全由 LQR 控制决定。因此本次研究中关于路感反馈系统的 SMC-LQR 混合控制策略的关键就是 e_{start} 和 e_{end} 的取值。对于一些对鲁棒性要求较高的系统，可能需要选择较大的 e_{start} ，以确保 SMC 能够在误差较大时起主导作用，对于一些对精确控制要求较高的系统，可能需要选

择较小的 e_{start} ，以便尽快切换到 LQR 控制，实现精确调节。因此，调整这两个参数可以根据实际系统的动态特性、目标精度以及对鲁棒性的要求进行优化。本次路感力矩模拟研究中预取值 $e_{start} = 0.3$ ， $e_{end} = 0.1$ 。

4.3.2 SMC-LQR 融合策略稳定性检验

4.1 小节中通过优化 SMC 控制策略的趋近律，减缓了函数在滑模面附近的趋近速度，减少了函数在滑模面上的“抖动现象”。4.2 小节中通过求解代数黎卡提方程，得到了 LQR 控制器中的增益矩阵 K ，从而确保了控制系统的最优性和稳定性。本小节在 Matlab/Simulink 中利用 Switch 模块搭建了路感电机的控制模型，模型框架如图 4-3 所示，成功地将上述控制策略与电机控制系统进行了结合，以实现精确的路感力矩系统控制。

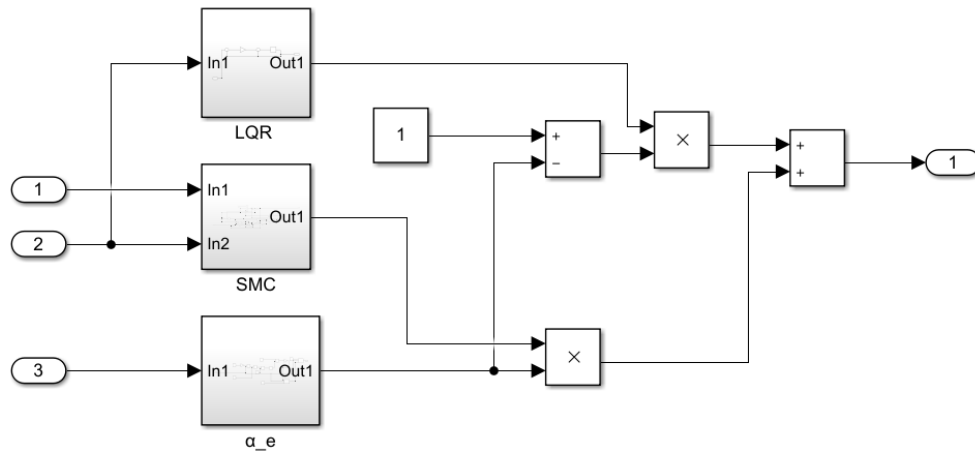


图 4-3 路感电机控制模型

4.4 基于矢量控制的路感电机控制策略

在路感模拟系统中，利用 SMC 与线性二次调节融合控制策略能够有效地提高电机控制的精度，改善系统的动态性能和稳定性。而精确的电机电流控制是实现这一高层控制的基础，因为电流控制直接决定了电机转矩和转速的输出精度。矢量控制(Field-Oriented Control, FOC)通过将交流电机的定子电流分解为磁场分量和转矩分量，独立地控制电机的转矩和磁场，使电机可以像直流电机一样实现精确控制，结合 SMC 的高鲁棒性与 LQR 的稳定性，可以在面对系统外部不确定扰动时，提升路感电机的控制精度^[67]。

4.4.1 电机和负载模型

本次研究所使用的电机为永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM), 永磁同步电机的电压方程在转子参考坐标系 (dq 坐标系) 下表示为:

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (4-22)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \quad (4-23)$$

式中: v_d 和 v_q 分别是 d 轴和 q 轴电压; i_d 和 i_q 分别是 d 轴和 q 轴电流; R_s 是定子电阻; L_d 和 L_q 分别是 d 轴和 q 轴电感; ω_e 为电角速度; ψ_f 为永磁体磁链。

永磁同步电机的电磁转矩方程如式(4-24)所示:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (4-24)$$

式中: T_e 为电磁转矩; p 为电机极对数。

路感电机的负载转矩包括车辆动力学和路感力矩, 可表示为:

$$T_L = J_r \frac{d\omega_r}{dt} + B_r \omega_r + T \quad (4-25)$$

式中: T_L 为路感电机的负载转矩; J_r 为路感电机的转动惯量; B_r 为路感电机的阻尼系数; ω_r 为路感电机的角速度; T 为路感力矩。

4.4.2 矢量控制

利用 Clarke 变换将三相静止坐标系(ABC)转换为两相静止坐标系($\alpha\beta$), 如式(4-26)所示:

$$\begin{cases} i_\alpha = i_a \\ i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_b - i_c) \end{cases} \quad (4-26)$$

利用 Park 变换将两相静止坐标系($\alpha\beta$)转换为两相旋转坐标系(dp), 如式(4-27)所示:

$$\begin{cases} i_d = i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta \\ i_q = -i_\alpha \sin \theta + i_\beta \cos \theta \end{cases} \quad (4-27)$$

式中: θ 为转子位置角。

电流环采用 PI 控制器，控制方程如式(4-28)所示：

$$\begin{cases} v_d^* = k_{p,d}(i_d^* - i_d) + k_{i,d} \int (i_d^* - i_d) dt \\ v_q^* = k_{p,q}(i_q^* - i_q) + k_{i,q} \int (i_q^* - i_q) dt \end{cases} \quad (4-28)$$

式中： v_d^* 和 v_q^* 分别为 d 轴和 q 轴电压参考值； $k_{p,d}$ 和 $k_{i,d}$ 为 d 轴 pi 控制器参数； $k_{p,q}$ 和 $k_{i,q}$ 为 q 轴 pi 控制器参数。

通过前馈补偿消除 d 轴和 q 轴电流的耦合，如式(4-29)所示：

$$\begin{cases} v_d = v_d^* - \omega_e L_q i_q \\ v_q = v_q^* + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (4-29)$$

对速度环采用 PI 控制器，控制方程如式(4-30)所示：

$$T_e^* = k_{p,w}(w_r^* - w_r) + k_{i,w} \int (w_r^* - w_r) dt \quad (4-30)$$

式中： T_e^* 为电磁转矩参考值； $k_{p,w}$ 和 $k_{i,w}$ 分别为速度环 PI 控制器的参数。

同理对位置环采用 PI 控制器，控制方程如式(4-31)所示：

$$w_r^* = k_{p,\theta}(\theta_r^* - \theta_r) + k_{i,\theta} \int (\theta_r^* - \theta_r) dt \quad (4-31)$$

式中： w_r^* 为转速参考值； $k_{p,\theta}$ 和 $k_{i,\theta}$ 分别为位置环 PI 控制器的参数。

4.4.3 基于群智能算法的 PI 参数优化

利用改进后的蜣螂算法对速度环和位置环的 PI 参数进行迭代，寻找最优值。在每次迭代中，算法根据当前解的位置计算适应度值，从而评估比例增益(KP)和积分增益(KI)对系统性能的影响。初期迭代时，参数取值波动较大，算法会选取不同的比例、积分参数对，寻找最优解，随着迭代次数的提升，算法会进入局部最优解。本次实验的迭代次数设置为 50，速度环 KP 的取值范围设置为(0, 5)， KI 的取值范围同样设置成(0, 5)，位置环 KP 和 KI 取值范围同速度环，迭代结果如图 4-4 和图 4-5 所示。

由图 4-4 可知，IDBO 迭代初期， KP 取值在 0 到 3 之间波动较大， KI 取值在 1 到 3 之间波动，第 12 次迭代后速度环 PI 参数达到最优值，IDBO 取值稳定，最终最佳 KP 为 1.77211， KI 为 1.20684。由图 4-5 可知，IDBO 迭代初期， KP 取值在 1 到 2 之间波动较大， KI 取值在 2 到 3 之间波动，第 20 次迭代后位置环 PI

参数达到最优值， KP 为 1.58484， KI 为 2.42890。

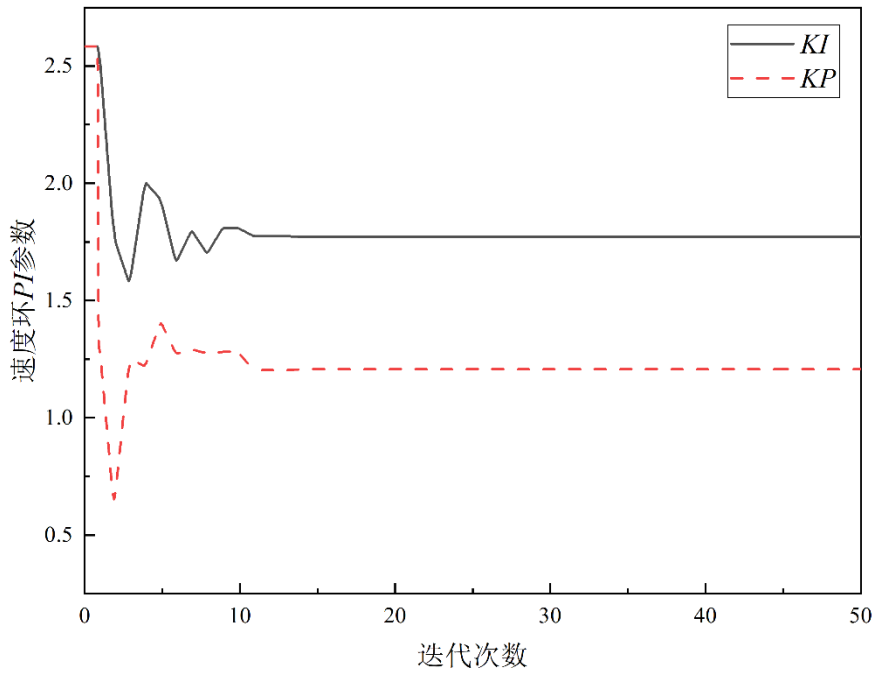


图 4-4 速度环 PI 参数迭代图

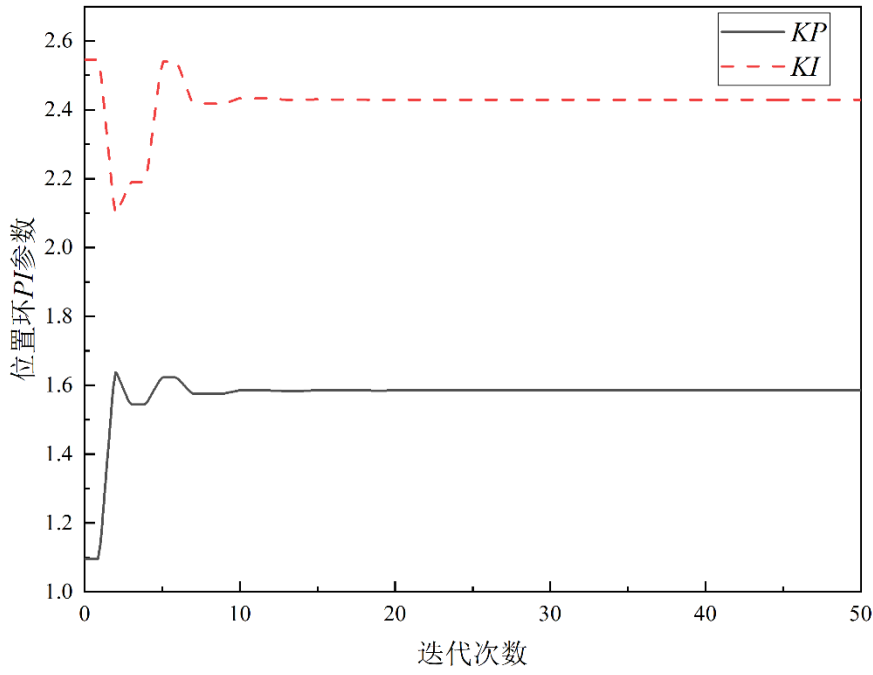


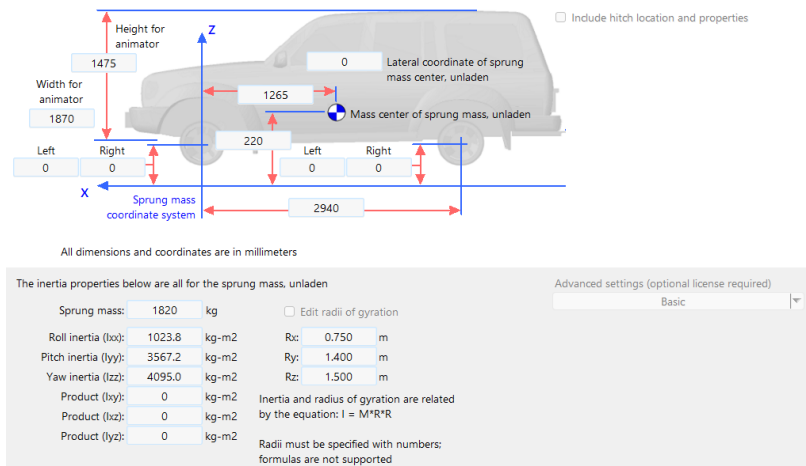
图 4-5 位置环 PI 参数迭代图

4.5 总结

本章对 SMC 控制策略和 LQR 控制策略分别进行了优化，并分析了两个控制策略的优缺点。为了使路感电机在面对复杂环境时具有较高的鲁棒性且不会出

现较大的波动,设计了切换函数,可以自由选择误差阈值,在控制初期利用 SMC 控制策略快速迭代,达到误差阈值后,切换到 LQR 控制策略,利用 LQR 控制策略稳定、计算量小的特点代替 SMC 控制策略对路感反馈系统中路感电机的力矩输出误差进行修正。为了稳固 SMC-LQR 上层控制策略的效果,利用矢量控制将交流电机的定子电流分解为磁场分量和转矩分量,独立地控制电机的转矩和转速,完成对路感电机的控制。

☐ Include hitch location and properties



53

Prescan 是由 TNO 公司开发的仿真平台，专为自动驾驶和 ADAS 设计，向用户提供了一个虚拟环境，支持道路、交通、传感器和环境感知模型的仿真平台。Prescan 还集成了多种传感器模型，如激光雷达、摄像头、雷达等，可以模拟复杂的交通和道路情况^[69]。与 Carsim 集成后，Prescan 能够提供实时反馈，与周围车辆和交通设施进行交互，测试车辆在不同驾驶条件下的表现。本次仿真实验设置了多种工况，包括转弯、直线变道、桥面行驶等，以确保仿真场景涵盖真实驾驶环能内比较常见的几个情景，如图 5-2 所示，运动学参数如图 5-3 所示。



图 5-2 Prescan 软件仿真场景

表 5-1 运动学参数

Prescan 参数	Proportional
初始速度(m/s)	0
结束速度(m/s)	15
极限速度(m/s)	22
最大加速度(m/s ²)	2.95
距离(m)	750
空气密度(kg/m ²)	1.28
万有引力(m/s ²)	9.81
滚动摩擦系数(kg)	0.01
阻力系数	0.27
质量(kg)	1820
参考体积(m ³)	2.33

Matlab 是一款广泛用于工程计算、数据分析及控制算法设计的强大工具，拥

有丰富的数学工具箱和编程环境，适用于系统建模、控制策略设计与优化以及数据分析等领域^[70]。在智能驾驶的研究中，Matlab 常用于算法开发、性能评估及系统验证。在本次仿真实验中，Matlab 主要用于改写车辆的控制策略的代码和作为联合仿真实验的平台，此外，Matlab 还能处理来自 Carsim 和 Prescan 的实时数据，通过控制算法实时调节车辆运动，并进行性能分析和优化。

5.2 虚拟联合仿真实验

本研究通过 Carsim、Prescan 和 Matlab 的联合仿真平台，模拟了智能网联汽车在不同场景下的行为，包括高速转弯、匀速直线变道和匀速上桥等动作。各软件的协同工作可以发挥各自软件的长处，进行综合研究，在联合仿真的过程中，Matlab/Simulink 完成了主要仿真任务，模型如图 5-3 所示。Prescan 提供了仿真所需要的各种场景，并担任车载传感器的工作，将车辆在 Prescan 中仿真的运动学数据实时传递到 Matlab/Simulink 中，与 Carsim 进行信息交互。Carsim 在整个联合仿真模型中担任整车控制器 VCU 和车辆内部动力学模型，在联合仿真时，读取 Prescan 的环境感知信息来进行车辆的动力学控制^[71]。图中展示了 Prescan 与 Carsim 的仿真连接端口以及实验车辆的 3D 模型，仿真时间设定为 45 s，步长为 0.001 s。

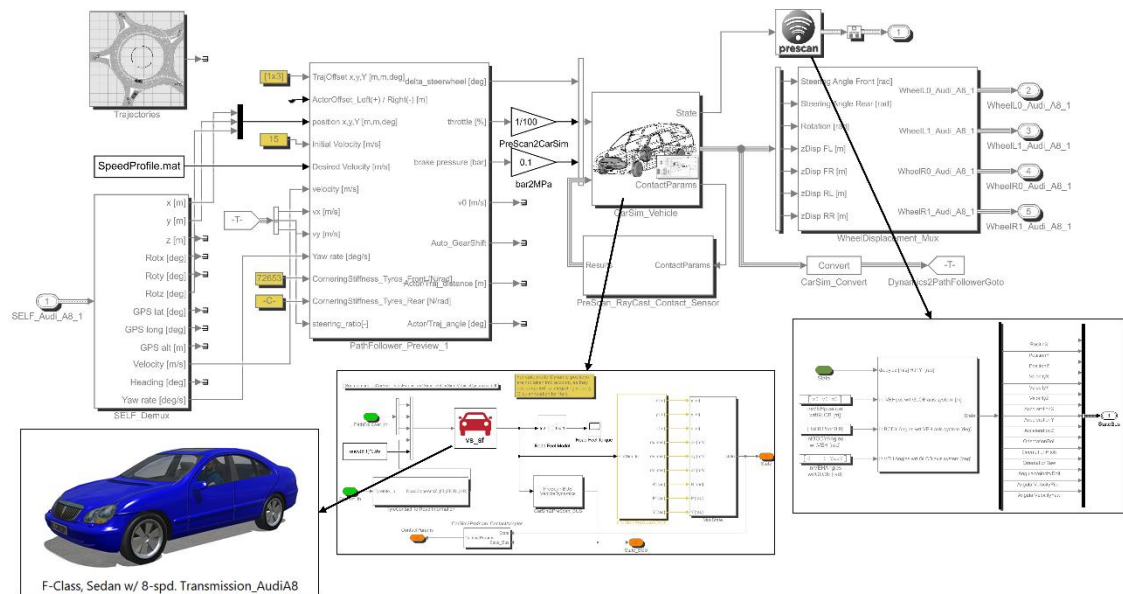


图 5-3 联合仿真模型

5.2.1 可变传动比计算实验

变传动比技术是线控转向系统与传统的机械转向、液压转向和电动助力转向系统之间的重要区别之一。它在转向精度、响应速度及驾驶员的路感反馈方面起着至关重要的作用。与传统系统不同，变传动比技术可以根据车辆的行驶状态和车速变化，动态调整转向比，从而使转向响应更加灵敏且符合驾驶需求，如图 5-4 所示。

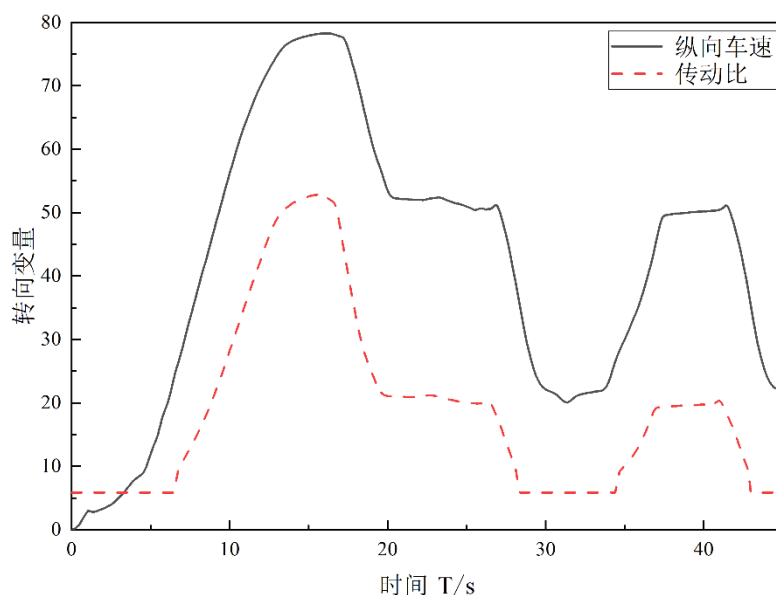


图 5-4 传动比与车速关系图

由图 5-4 可知，车辆在行驶过程中纵向车速在前 5 s 保持较低的水平，转向传动比也保持一个较为恒定的低数值，这意味着只需要轻微转动方向盘就能得到较大的车轮转向，符合车辆在起步阶段的转向诉求。5 s 到 15 s 车辆保持一个较高的加速度，15 s 后车速到达峰值 80km/h，在这个过程中，转向传动比也持续上升，15 s 左右随着车速一起达到了峰值，这意味着驾驶员此时需要转动更大角度的方向盘才能让车轮转动较小的角度，这样的设计可以防止高速行驶的情况下，由于驾驶员的无意识举动或者其他突发情况导致方向盘角度瞬间大幅度变化引起的车辆侧翻。15 s 到 20 s、26 s 到 29 s、35 s 到 37 s 和 42 s 到 43 s 内转向传动比均跟随着车速的变化做出了较快的响应。20 s 到 26 s、29 s 到 35 s 和 37 s 到 42 s 由于车辆做低速直线行驶，转向传动比保持在一个较低的水平并未变化。

综上所述，可以验证所设计的变传动比模型在车速变化时具有较好的跟随性，且不会被直线行驶的车速变化所干扰。

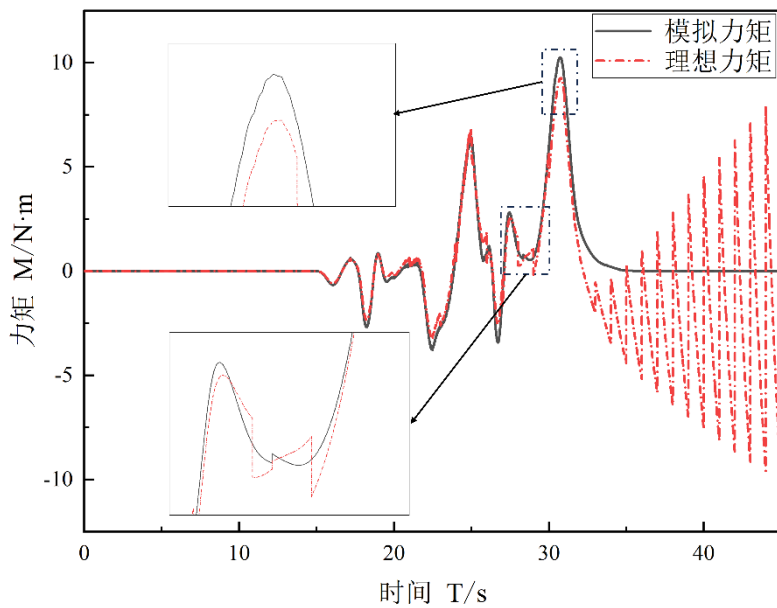
5.2.2 SMC-LQR 融合控制策略对比试验

为了验证 4.3 小节和 4.4 小节中设计的 SMC-LQR 融合控制策略和矢量控制策略在路感反馈系统中对路感电机具有良好的控制效果,设计 SMC-LQR 控制策略和 PID 控制策略的对比实验,利用 Prescan、Matlab 和 Carsim 进行联合仿真,PID 控制各参数如表 5-2 所示,实验结果如图 5-5 所示。

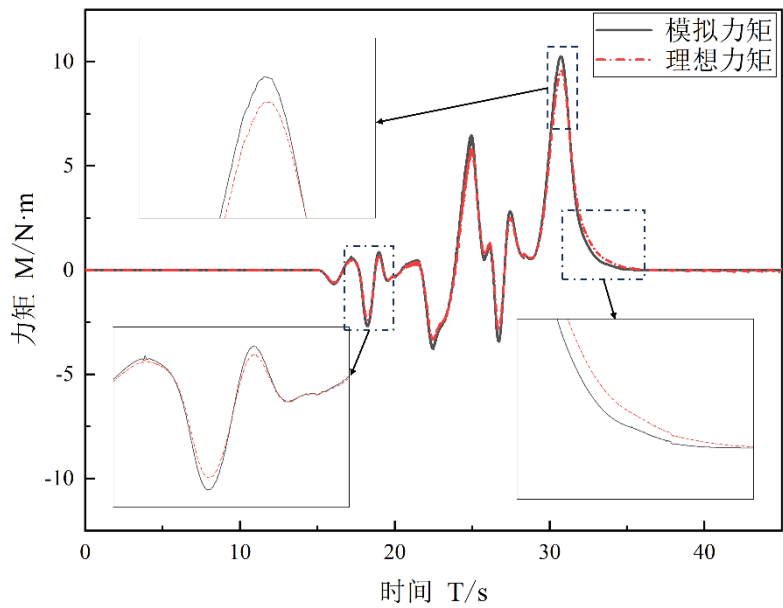
表 5-2 PID 控制策略各参数

	Proportional	Integral	derivative
PID 参数	0.9	0.2	0

从图 6(b)中的曲线图可以看出,在 0 s 到 32 s 的时间段内,SMC-LQR 融合控制下的电机输出没有表现出明显的振荡,而在 32 s 到 45 s 之间出现了轻微的振荡。此外,在 15 s 之前,车辆以恒定速度行驶,两个控制策略之间的电机误差没有显著差异。从 15 s 到 32 s 的误差数据如表 3 所示。对比结果表明,SMC-LQR 融合控制策略下电机的平均输出误差减少了 $0.26605 \text{ N}\cdot\text{m}$,最大误差减少了约 $1.85490 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。从 32 s 到 45 s, PID 控制下的路感电机输出失去了稳定性,而 SMC-LQR 融合控制策略下的路感电机输出保持稳定。综合分析表明,SMC-LQR 融合控制策略在本次路感仿真中优于 PID 控制,表现出更强的鲁棒性。



(a) PID 控制策略效果图



(b) SMC-LQR 融合控制策略效果图
图 5-5 SMC-LQR 和 PID 控制效果对比图

5.3 台架实验

如图 5-6 所示为线控转向系统实验台架,A 为方向盘,B 为转矩转角传感器,C 为电机驱动电路,D 为转向电机,E 为电动助力转向系统(Deps),F 为上位机(连接电脑和方向盘,使用 Windows 系统)和下位机(连接 Deps 设备,负责收集信号并通过控制器局域网(Controller Area Network, CAN)传递给上位机)。

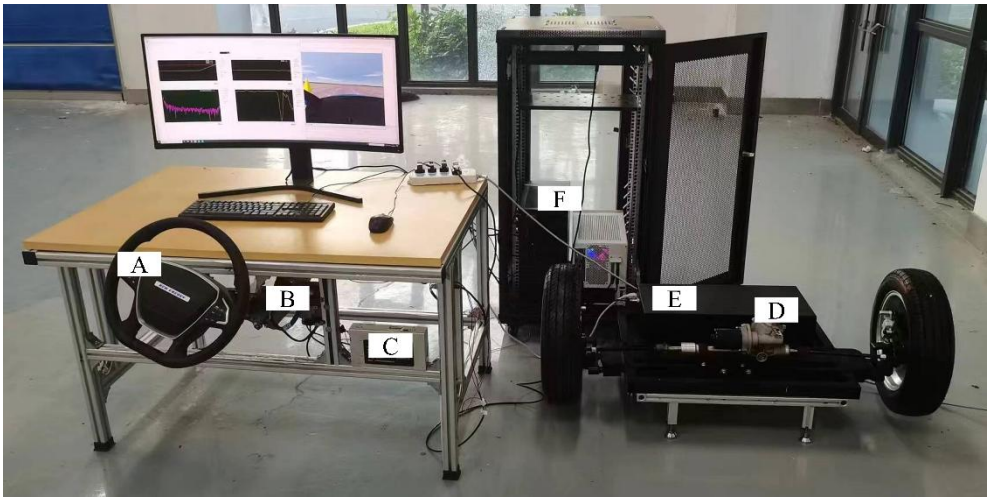
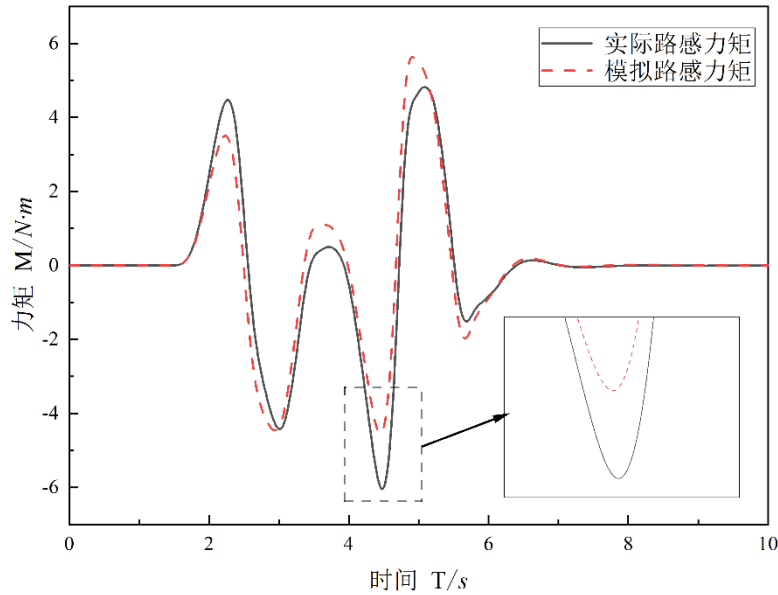


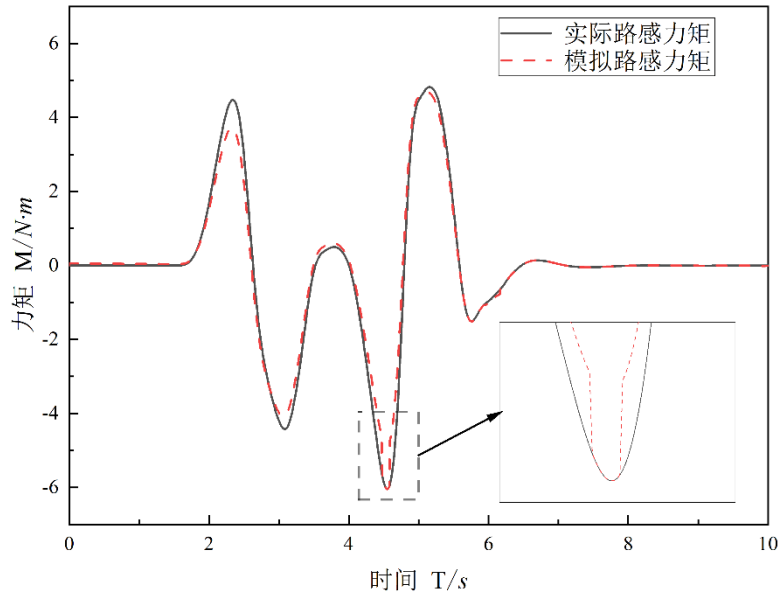
图 5-6 线控转向实验台架

5.2 小节通过 Carsim 与 Prescan 联合虚拟仿真实验证明优化后的 SMC-LQR 控制策略比 PID 控制策略的控制效果更优秀。本小节将利用实验台架对路感模

型的鲁棒性和精确性进行验证，本次实验所使用的虚拟工况为双移线工况，在工况中，汽车会以较高的车速沿预定的路线在短时间内做两次快速变道，对汽车 SBW 系统的跟随性和误差性提出了非常高的要求。本次实验利用 Carism 提供车辆模型，Veristand 提供实验环境，Can 通信连接上位机和下位机，设置改进后模型和未改进模型的路感力矩模拟效果对比实验，真实路感力矩数据由转矩转角传感器 B 提供，实验结果如图 5-7 所示。



(a) 未优化模型效果图



(b) 优化后模型效果图

图 5-7 路感力矩仿真实验结果图

表 5-3 展示了图 5-8 中改进后的前路感模型和后路感模型的误差对比。与原始路感模型相比，改进后的路感模型在模拟路感力矩时，最大误差、平均误差和

均方误差分别减少了 1.24497 N·m、0.18668 N·m 和 0.31205 N·m，验证了本文所建立的各项路感优化方案。

表 5-3 模拟与理想扭矩的误差表

	最大误差	最小误差	平均误差	均方误差
优化前/(N·m)	2.05651	0.00004	0.32706	0.59123
优化后/(N·m)	0.81154	0.00085	0.14038	0.27918

5.4 实车实验

为了更全面地评估和验证改进后的控制算法和路感模型的实际应用性能，本节将进行实车实验，对比优化前后的路感系统在蛇形驾驶工况中的表现，从而验证虚拟仿真结果的准确性和可靠性。如图 5-8 中线控底盘的转向系统主要由转向供电系统，转向机总成和转向机控制器组成。转向机供电由 12 VDC 标准车载系统提供，采用阿克曼转向原理并支持四轮/楔形转向模式。系统通过 CAN 2.0 B 协议（通信速率 500 kps）实现目标方向盘转角与角速度的闭环控制，转向角稳态误差 $\leq \pm 1^\circ$ ，超调量 $\leq 15^\circ$ ，响应时间 $\leq 150\text{ ms}$ ，转向拉杆最大输出力达 10 kN，充分满足高动态场景下的路径跟踪与负载需求。

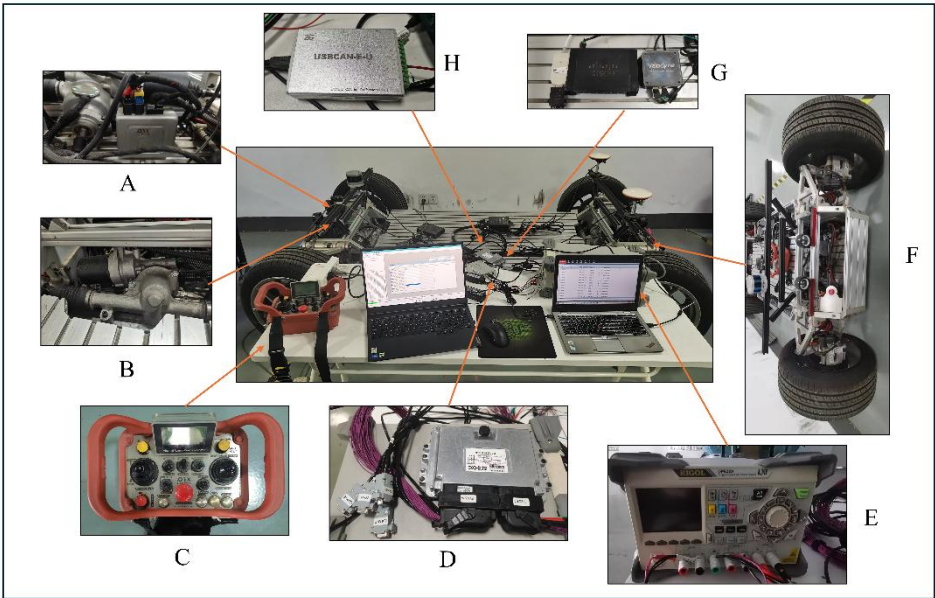


图 5-8 线控底盘

A 为 ECU 转向控制器；B 为转向电机；C 为手动控制器；D 为 VCU 整车控制器；E 为信号发生器；F 为转向轴和车轮；G 为 CAN 卡，路由器，激光雷达

驱动器（从左到右）；H 为 Can 通信应用协议分析工具。

本次实车实验具体操作流程如下：

(1) 在室内环境下将线控底盘架空，并预设行驶工况。

(2) 在 ECU 转向控制器中写入预先设计的控制策略程序，同时启动虚拟仿真系统与线控底盘硬件系统，确保两者同步运行。通过 CAN 通信协议实时采集转向系统的转角信号和车轮转速信号，记录虚拟仿真与硬件系统的运行数据。

(3) 如图 5-9 所示，将线控底盘移至实验场地，在相同工况下进行实际道路试验，采集实际行驶中的车轮转角数据。



图 5-9 实车实验

(4) 将虚拟仿真模型计算出的理论转角、室内架空试验中空转的车轮转角以及试验场地中实际测得的车轮转角数据进行对比分析，如图 5-10 所示。

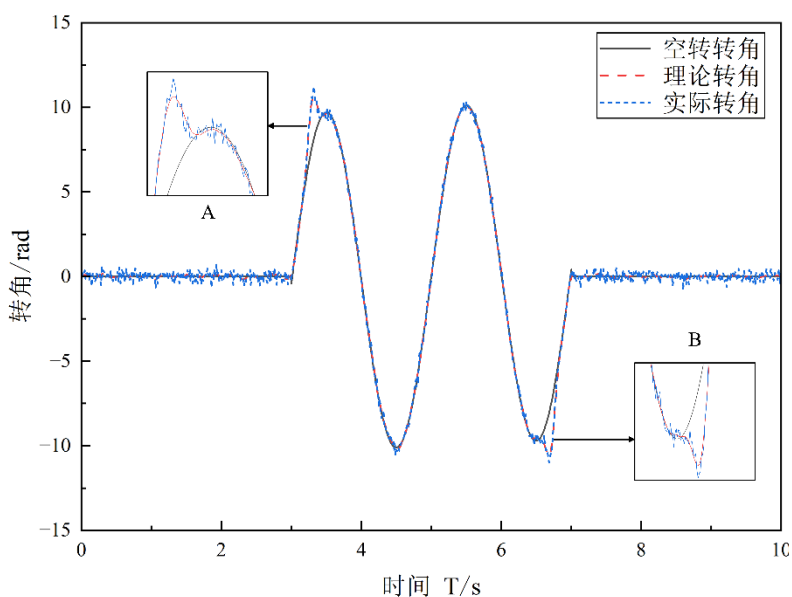


图 5-10 蛇形工况转角对比曲线图

由图 5-10 可知，在室内空转的情况下，由于没有摩擦阻力，风阻等影响因素，车辆的转角趋于理论值。当车辆行驶在路面上，车轮在行驶过程中会出现微小的波动，并在图中 A、B 两个时间段出现了较大的突变现象，而本文第 2 章所建立的转向模型同样也出现了突变现象，说明了本文所设计的基于车辆动力学模型和变传动比模型贴近真实情况，并可以过滤微小的扰动，即在不影响车辆实际行驶轨迹的前提下，可以大幅度提高驾驶的稳定性。

利用安装在车轮上的压力传感器，在蛇形工况下，对比室内空转、路感力矩模拟模型计算，以及真实道路上路感力矩变化。此外，为了进一步展示所搭建的路感力矩计算模型的效果，真实道路选择国际标准路面不平度指数(International Roughness Index, IRI)约为 4~6 m/km，的轻微颠簸路段。整理数据结果如图 5-11 所示。

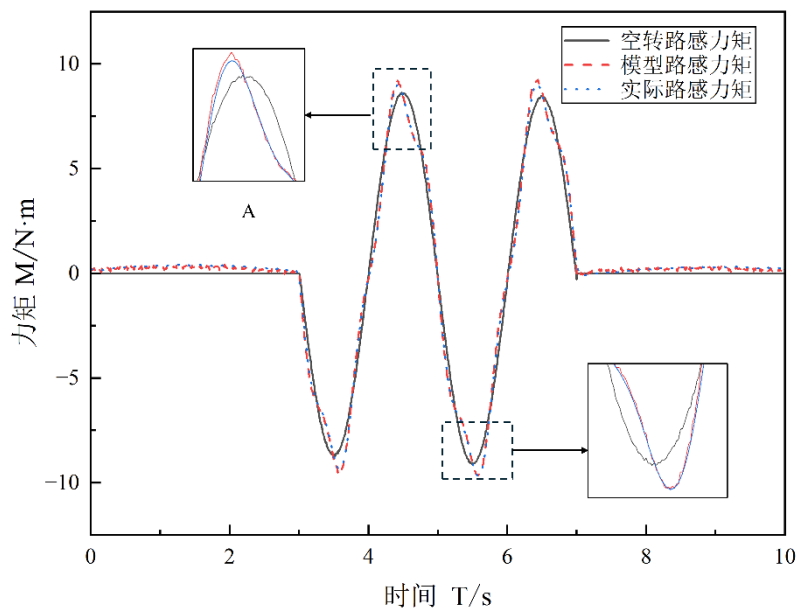


图 5-11 蛇形工况路感力矩曲线图

由图 5-11 可知，由于本次研究所搭建的路感力矩模型，在蛇形工况下，具有较好的模拟效果，可以过滤掉路面上的颠簸，显著提高驾驶员在颠簸路面上的驾驶体验。除此之外，可以看到在 3.6s、4.6s、5.5s、6.4s 的转向时间点，本次研究搭建的路感力矩模型具有较好的跟随性，且过渡平滑没有突变手感，但是在直线行驶时，由于外界不确定干扰因素，导致模型模拟路感力矩和真实路感力矩出现较为轻微的波动。具体误差如表 5-4 所示。

表 5-4 实车试验模型误差表

	最大误差	最小误差	平均误差	平方误差
模型模拟路感力矩/($N \cdot m$)	0.7389	0.1531	0.121	0.145

5.5 总结

本章通过虚拟联合仿真、台架实验和实车实验，验证了智能网联汽车在不同控制策略下的性能与鲁棒性。在虚拟联合仿真部分，采用了 Carsim、Prescan 和 Matlab 三款软件工具，构建了完整的仿真平台，以模拟汽车在不同工况下的动态表现。通过 Carsim 与 Prescan 的结合，实现了复杂路况和交通场景的模拟。在仿真实验中，展示了第二章设计的可变传动比随着车速变化的曲线图，实现了车辆在低速情况下具备较轻的转向手感，而在高速情况下抑制大幅度转向动作，优化了驾驶员的驾驶体验。设计 SMC-LQR 控制策略和 PID 控制策略在路感电机上的控制效果对比实验，验证了 SMC-LQR 控制策略具有更优秀的控制效果。在台架实验中，搭建了完全机械解耦的线控转向样机，利用 Veristand 平台对所搭建的路感力矩模拟模型进行了初步验证，最后在线控底盘上先后在理想环境和实际道路环境对路感力矩模拟模型进行了验证，证明了所设计的路感力矩模拟模型在不影响车辆实际行驶轨迹的前提下，可以大幅度提高驾驶的稳定性。

第 6 章 总结与展望

6.1 全文总结

本文研究了线控转向系统的动力学模型和路感力矩的计算模型,并利用经过混沌映射、黄金余弦策略和惩罚函数优化收敛速度和搜索范围后的蜣螂算法对传动比、矢量控制速度环和位置环的 PI 参数进行迭代寻找最优解。随后通过基于 Carsim 和魔术轮胎公式的车轮侧向力拟合公式和无迹卡尔曼滤波对所搭建的基于回正力矩和转向系统动力学公式的路感力矩计算模型进行过滤噪音、优化模拟效果。同时,为了进一步稳定路感力矩的模拟效果,提升鲁棒性,从系统层面优化了 SMC 控制策略和 LQR 控制策略,建立了一个切换函数,使得 SMC-LQR 控制策略在集合了 SMC 控制策略和 LQR 控制策略的优点后可以快速控制路感电机的力矩输出误差,并从路感电机本身出发,通过控制电流,控制路感电机的转矩和转速输出,完成对路感系统的控制。

为了验证理论部分的成果,在搭建的 Carsim、Prescan 和 Matlab/Simulink 的联合仿真平台、完全机械解耦的线控转向台架和线控实车平台设计了对比实验,并进行了结果分析,证明了所构件的路感力矩模型在不影响车辆实际行驶轨迹的前提下,可以大幅度提高驾驶的稳定性。

本文主要研究结论如下:

(1)建立了基于转向系统动力学模型搭建的转向模型,具有计算简单、结果真实的优点。以车辆稳定性指标为目标函数,建立了可以根据车辆自身参数变化而实时迭代最佳转向增益的算法。

(2)提出了基于混沌映射、黄金正弦策略和惩罚函数优化的蜣螂算法(DBO),实验证明优化后的蜣螂算法具有更大的搜索范围,不易陷入局部最优解,且相比原始蜣螂算法、鲸鱼算法、粒子群算法、麻雀算法具有更快的迭代速度。

(3)路感作为一个诸多因素错综复杂的集合体,本文以车轮回正力矩和重力回正力矩为基础,增加方向盘摩擦力矩进行修正,建立了路感力矩计算的粗略框架,最后利用无迹卡尔曼滤波对传感器接收的无效杂乱信息进行过滤,完成了路

感力矩计算模型的搭建。

(4)分别对 SMC 控制策略和 LQR 控制策略进行了优化，并利用切换函数完成了新型融合控制策略 SMC-LQR 的设计，所设计的融合控制策略 SMC-LQR 不仅具有 SMC 控制策略的高鲁棒性和快速收敛性，还兼具 LQR 控制策略在误差较小时的计算量小，稳定的特点。

6.2 工作展望

本文在线控转向动力学模型的基础上，完成了对路感力矩计算模型的搭建和优化，并建立了基于 SMC-LQR 和矢量控制的路感电机控制策略，但是由于研究时间和研究器材的限制，本文的研究还存在以下需要继续改进的地方

(1)本文所建立的路感力矩模型，没有考虑到长时间工作导致的电子老化、电机功率下降等问题，需要采集数据进行进一步研究。

(2)本文实车实验所使用的均为厂区封闭道路，道路情况单一，不能对不同环境下的车辆转向力矩反馈进行测量，无法验证本文所建立的路感力矩计算模型在干扰因素更加丰富、道路更加复杂的环境下是否依旧具有较好的模拟效果。

(3)本文所研究的改进蜣螂算法虽然在搜索范围和收敛速度上得到了加强，但是依旧占据大量的计算空间，后续需要对位置寻优公式进行进一步优化，简化寻优过程，降低实际计算过程中对控制器的负担。

参考文献

- [1] 张寒, 刘开华, 王春燕, 等. 四轮分布式线控转向系统稳定与协调控制研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(10):425-438.
- [2] 王浩宇, 左志强, 邓宇翔, 等. 无人驾驶车辆运动控制综述[J]. 控制理论与应用, 2024, 41(09):1507-1522.
- [3] 贺林, 徐子昂, 黄春荣, 等. 线控转向系统转角预测滑模控制算法研究[J]. 汽车工程, 2023, 45(12):2200-2208.
- [4] 郭耀华, 丁金全, 王长新, 等. 商用车底盘线控技术研究现状及应用进展[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(06):695-714.
- [5] 田承伟. 线控转向汽车容错控制方法研究[D]. 长春:吉林大学, 2010.
- [6] Howser G, Mcmillin B. Modeling and reasoning about the security of drive-by-wire automobile systems[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2012, 5(3-4):127-134.
- [7] 解后循. 基于综合路感强度理论的电动液压助力转向技术研究[D]. 镇江:江苏大学, 2015.
- [8] 杨军, 陈无畏, 赵林峰, 等. 基于 ESP 功能分配的 EPS 回正力矩补偿控制策略[J]. 汽车工程, 2015, 37(07):794-801.
- [9] Vincent J, Glaser Sébastien, Dominique G, et al. Fault Detection and Isolation via the Interacting Multiple Model Approach Applied to Drive-By-Wire Vehicles[J]. Sensors, 2018, 18(7):2332.
- [10] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述 • 2023[J]. 中国公路学报, 2023, 36(11):1-192.
- [11] 陈应鹏, 刘贺. 线控转向系统路感模拟控制研究[J]. 内燃机与配件, 2019, (22):1-3.

- [12] 崔江涛, 殷茵. CAN 多主总线技术在电动汽车控制系统中的应用研究[J]. 长江信息通信, 2023, 36(01):117-119.
- [13] 袁臣虎, 杨玉明, 刘晓明, 等. 基于 PMSM 的线控转向系统路感控制策略[J]. 天津工业大学学报, 2019, 38(04):64-69.
- [14] 许斌, 夏晨. 基于模糊控制的车辆线控转向变角传动比研究[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(03):15-23.
- [15] 张雷, 王子浩, 孙逢春, 等. 四轮轮毂电机驱动智能电动汽车转向失效容错控制研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(20):141-152.
- [16] 何肖军, 杨坤, 马超, 等. 线控转向系统的路感设计研究[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(02):806-815.
- [17] Huang C, Naghdy F, Du H, et al. Fault tolerant steer-by-wire systems: An overview[J]. Annual Reviews in Control, 2019, 47:98-111.
- [18] 宗长富, 李刚, 郑宏宇, 等. 线控汽车底盘控制技术研究进展及展望[J]. 中国公路学报, 2013, 26(02):160-176.
- [19] 科技革命奔驰 F400[J]. 汽车维修, 2002, (10):31-33.
- [20] 邓雅静. 可持续与智能化交相辉映, 创新成果集中亮相——记 2023 德国柏林国际消费电子展[J]. 电器, 2023, (10):74-77.
- [21] 王帅, 施国标, 桑冬岗, 等. 线控双电机转向系统滑模同步控制及其硬件在环仿真[J]. 中国公路学报, 2021, 34(09):61-69.
- [22] Iliff L. Cybertruck specs indicate EV pickup competition[J]. Automotive news, 2023, 97(TN.7102):4-36.
- [23] 特斯拉 CyberTruck[J]. 汽车知识, 2020, (01):38-39.
- [24] GB 17675 – 2021, 汽车转向系统基本要求[S]. 北京:中国标准出版社, 2021.
- [25] 工业和信息化部, 国家发展改革委, 科技部, 等. 新能源汽车产业发展规划

- (2021 - 2035 年) [R]. 北京: 国务院, 2020.
- [26] 王帅国. 智能底盘“争春” [N]. 经济观察报, 2025-01-27(017).
- [27] 王菊, 左建令. 汽车线控转向技术的研发现状及发展前景[J]. 汽车研究与开发, 2005, (05):30-35.
- [28] 张晓宇, 赵海斌, 周小柯. 中国新能源汽车产业发展现状及其问题分析——基于我国汽车产业可持续发展的视角[J]. 理论与现代化, 2011, (02):60-66.
- [29] 王金玉. 十年技术研发“结晶” ET9 上市, 蔚来奔向“决赛圈” [N]. 中国汽车报, 2024-12-23(004).
- [30] Iman, Mousavinejad, Reza, et al. Variable structure controller design for steer-by-wire system of a passenger car[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(8):3285-3299.
- [31] 张君, 邱江波, 屈翔, 等. 线控转向系统路感反馈与主动回正控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(06):75-84.
- [32] 熊治强, 张鑫玉. 基于无迹卡尔曼滤波的汽车线控转向路感模拟研究[J]. 成都工业学院学报, 2025, 28(01):7-13.
- [33] 高尚, 王伟, 高磊, 等. 基于动态驾驶模拟器的可变转向比仿真及测试评价[J]. 科技通报, 2025, 41(02):106-111.
- [34] 常斌. 汽车机械系统对路感模拟的影响[J]. 自动化应用, 2024, 65(09):234-237.
- [35] 谢有浩, 赵林峰, 陈无畏, 等. 低附着路面条件的线控转向系统路感模拟与回正控制研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(16):148-158.
- [36] 任夏楠, 邓兆祥. 驾驶员理想转向盘力矩特性研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(16):2261-2265.
- [37] 解后循, 高翔, 夏长高. 基于综合路感强度的方向盘转向力矩特性分析[J].

机械科学与技术, 2012, 31(07):1104-1109.

- [38] 吴瑾, 田杰, 罗石. 基于模糊 PID 的线控转向系统路感控制研究[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(06):919-923.
- [39] 刘书翰, 吴晓东, 梁登宇, 等. 基于转速参考模型的线控转向主动回正控制[J]. 汽车工程学报, 2025, 15(01):108-115.
- [40] 文媛媛. 基于不同路面条件的线控转向系统路感模拟研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2024.
- [41] 谢立刚, 陈勇. 线控转向汽车路感控制策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(04):68-74.
- [42] 龙安源. 线控转向系统的路感反馈及控制研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2024.
- [43] Zhang S, Sun P, Pang Y, et al. An autonomous driving decision-making framework for joint prediction and planning in unsignalized intersection scenarios[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering, 2025.
- [44] 杨蕊绽. 基于转向负载观测的线控转向系统路感模拟研究[D]. 长春:吉林大学, 2023.
- [45] Liang W, Zhao W, Wang C, et al. Harmonic suppression and road feeling control of steer-by-wire system with permanent magnet synchronous motor[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2022, 172:108983.
- [46] Ahmet, Kirli, Mehmet, et al. Online optimized hysteresis-based steering feel model for steer-by-wire systems[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(7):77-80.
- [47] 赵含雪, 李芳, 吴艳, 等. 线控转向系统路感模拟与主动回正控制[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(04):64-72.

- [48] Wu X, Zhang M, Xu M, et al. Adaptive feedforward control of a steer-by-wire system by online parameter estimator[J]. International Journal of Automotive Technology, 2018, 19(1):159-166.
- [49] 赵帅帅. 基于 LuGre 模型的线控转向系统摩擦补偿[J]. 汽车实用技术, 2025, 50(03):86-90+99.
- [50] 袁丽秋. 基于粒子群优化算法设计线控转向传动比[J]. 内江科技, 2024, 45(12):28-30+128.
- [51] 王晓峰, 汪选要. 线控转向系统变角传动比设计及路感模拟[J]. 机械设计与制造, 2021, (03):185-188.
- [52] 寇发荣, 方博, 张新乾, 等. 汽车线控转向系统自适应变增益传动比设计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(05):8-15+29.
- [53] 庄威洋. 车辆线控主动转向变传动比算法及转向系统控制策略研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2022.
- [54] 陈哲明, 钟诚, 李环宇, 等. 粒子群优化线控转向变角传动比模糊控制器设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(12):41-49.
- [55] 郭孔辉, 丁海涛, 宗长富, 等. 人—车闭环操纵性评价与优化的研究进展[J]. 机械工程学报, 2003, (10):27-35.
- [56] 陈明岚. 操纵稳定性综合评价和基于组合遗传算法的优化[D]. 长春:吉林大学, 2002.
- [57] Xue J, Shen B. Dung beetle optimizer: a new meta-heuristic algorithm for global optimization[J]. The Journal of Supercomputing, 2022:1-32.
- [58] Tanyildizi E, Demir G. Golden Sine Algorithm: A Novel Math-Inspired Algorithm[J]. Advances in Electrical and Computer Engineering, 2017, 17(2):71-78.
- [59] 李红娟, 王泽政, 王永富. 线控转向系统的自适应高阶滑模控制[J]. 控制与

决策, 2021, 36(06):1529-1536.

- [60] Wilhelm, Frederic, Tamura, et al. Friction Compensation Control for Power Steering[J]. IEEE transactions on control systems technology: A publication of the IEEE Control Systems Society, 2016, 24(4):1354-1367.
- [61] 汤瑞清, 郭利. 主销倾角与偏距对汽车悬架转向系的性能影响研究[J]. 机械工程与自动化, 2017, (02):35-37.
- [62] 尹珩泮, 卢荡, 闵海涛, 等. 侧倾角对轮胎转偏力学特性影响研究[J]. 汽车工程, 2025, 47(02):342-355.
- [63] Pacejka HB, Bakker E. The magic formula tire model[J]. 1992.
- [64] Efimov D, Polyakov A, Fridman L, et al. Delayed Sliding Mode Control[J]. Automatic Control IEEE Transactions on, 2016, 64:37-43.
- [65] Kwakernaak H, Sivan R, Tyreus B N D . Linear Optimal Control System[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1974, 96(3):373.
- [66] Anderson B D O. Optimal Control: Linear Quadratic Methods[J]. Prentice-Hall International, 2013, 251.
- [67] 张建臣, 郑全, 朱恒伟, 等. 线控转向永磁同步电机的矢量控制研究[J]. 电子世界, 2020, (17):104-105+109.
- [68] 黄向荣, 李东烈, 韦程杰, 等. PreScan/CarSim/Simulink 联合仿真在智能驾驶仿真中的应用进展[J]. 时代汽车, 2024, (16):22-24.
- [69] 张微, 李鑫慧, 吴学易, 等. 自动驾驶仿真技术研究现状[J]. 汽车电器, 2019, (08):13-15+18.
- [70] 马园杰, 周旭. 基于 MATLAB/Simulink 的车辆转向稳定性的仿真研究[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(03):34-36.
- [71] 周婷婷, 王刚, 邓嘉钊, 等. 基于 PreScan/CarSim/Simulink/ROS 的路径跟随

控制仿真[J]. 时代汽车, 2024, (10):4-7+14.

攻读硕士学位期间发表学术论文及参研项目

发表论文:

- 1、Xiao P, Fang Z, Jin K, et al. Study of the road feel model of a steer-by-wire system based on an improved dung beetle optimization algorithm[J]. Electrical Engineering:1-12[2025-03-19]. (SCI 收录)
- 2、方震宇, 肖平, 杨东德. 基于麻雀算法和滑模控制的路感模拟研究[J]. 重庆科技大学学报(自然科学版), 2024, 26(06):98-104.

参加项目:

- 1、智能网联汽车转向系统创新设计(202310363008): 国家级项目, 提供项目研究所需的技术支持, 撰写项目研究报告和论文中的技术部分。
- 2、无人驾驶自卸充电车(SZC300010): 参与无人充电小车的设计与组装, 并完成景区试运营。
- 3、《智能网联汽车线控底盘技术》大学教材编撰项目: 参与理论框架与实训实验的编撰工作以及授课内容规划。

致谢

在论文即将完成之际，回顾整个研究过程，我深知没有导师、学院、同学、朋友和家人的支持与帮助，我无法顺利地走到今天。借此机会，我想表达我最真挚的感谢之情。

首先，衷心感谢我的导师肖平教授在学术上对我的悉心指导和无私帮助。从论文选题、研究思路的确立，到实验过程中的具体指导，以及论文撰写、修改等各个环节，肖老师始终给予了我细致入微的指导和无微不至的关心。在论文写作过程中，肖老师不辞辛劳地帮助我修改、提升，让我从中学会了如何更严谨、清晰地表述我的研究成果，也培养了我学术研究中持之以恒的毅力和责任心。肖老师严谨的治学态度、丰富的科研经验和敏锐的学术洞察力不仅指导我完成了这篇论文，也为我未来的学术研究和职业发展奠定了坚实的基础。肖老师在学术上始终保持的谦逊、专注精神深深感染了我，让我在学术道路上收获良多。

此外，感谢安徽工程大学机械与汽车工程学院的各位老师和同学们。在学术研究的过程中，我得到了许多老师和同学的帮助与支持。感谢学院的老师们在我学业和科研道路上的指引，为我提供了重要的基础知识、前沿的学科视角以及解决问题的思维方法。尤其是在我的研究过程中，学院的各位老师和同学总是在我遇到困难时给予建议与鼓励，帮助我不断克服瓶颈。学院良好的学术氛围、丰富的学习资源以及先进的实验设备，为我在科研中获取可靠数据和深入分析提供了宝贵的帮助。没有学院的支持与资源保障，我的研究工作将难以顺利开展。

特别感谢我的同门和实验室的同学们，在我遇到难题时，大家总是第一时间给予帮助和解答。我们在一起讨论学术问题、分享经验和成果，共同面对困难，推动了彼此的进步。尤其是在实验操作、数据分析和论文写作上，大家的热心帮助和宝贵建议使我少走了许多弯路，也让我在科研探索中不断成长。

尚德敏学 唯实惟新

