

分类号: U469.72

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220110171



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 微型纯电动汽车驱动系统
研究

论文作者 张啸宇

校内导师 肖平 教授

专业学位类别 机械

研究方向(领域) 微型纯电动汽车

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号：U469.72

学校代码：10363

密 级：公开

学 号：2220110171

微型纯电动汽车驱动系统研究

Research on the Drive System of Micro Pure Electric Vehicles

学生姓名：张啸宇

指导教师：肖平（教授）

专 业：机械

研究方向：微型纯电动汽车

论文答辩日期：2025 年 5 月 10 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：张啸宇

日期：2025年5月10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：张啸宇

指导教师签名：肖平

日期：2025年 5月 10日

日期：2025年 5月 10日

微型纯电动汽车驱动系统研究

摘 要

随着世界生态环境问题日益严峻以及新能源技术的迅速发展，新能源汽车在汽车行业中的地位将愈发重要。在众多新能源汽车类型中，微型纯电动汽车凭借自身耗电少、体积小、操作方便等优点，受到年轻消费者的青睐。正因如此，微型纯电动汽车驱动系统的研究已经成为新能源汽车领域的焦点之一，其中针对微型纯电动汽车轮毂电机的研究显得尤为关键。本文通过将改进优化算法与 PID 控制相结合，旨在提高微型纯电动汽车驱动电机的可靠性和稳定性。

本文提出了一种多策略融合改进的蜣螂优化算法，以实现四轮轮毂电机驱动的微型纯电动汽车轮速更精确的控制。首先，基于理论与数学模型，建立了微型纯电动汽车的仿真模型。随后，根据永磁无刷直流电机的原理与结构，为试验中使用的电机建立了数学和仿真模型。最后，通过仿真试验，明确了轮毂电机的驱动与控制需求。在算法设计上，进行了多算法的比较与改进。在相同的试验条件下，对比多种元启发式算法优化 PID 控制参数的能力。仿真结果表明，基于多策略融合改进蜣螂优化算法的 PID 控制，能够在极短的时间内改善电机的上升时间和调整时间，同时提升系统的稳定性并且降低电机转速改变时的最大超调量。这表明多策略融合改进蜣螂优化算法在 PID 控制优化方面具有更高的控制精度和更优秀的响应性能。

主要研究内容与结果如下：

(1) 通过分析四轮轮毂电机驱动微型纯电动汽车的工作原理及各模块的数学模型，搭建微型纯电动汽车的整车模型。测试不同目标工况下，汽车仿真行驶的速度与汽车预设的模拟行驶速度的一致性，并且通过数据分析验证整车模型的正确性与可行性。

(2) 阐述永磁无刷直流电机工作原理和基本结构，并且基于永磁无刷直流电机的数学模型搭建永磁无刷直流电机的 Simulink 仿真模型。通过对仿真结果进行计算和对比，验证搭建的永磁无刷直流电机的仿真模型能否满足试验需求。

(3) 研究多种元启发式算法在永磁无刷直流电机的控制参数优化中的应用，并且对比每种算法应用于 PID 控制参数优化效果的优劣。结果表明，采用多策略融合改进蜣螂优化算法整定 PID 控制参数，其系统稳定性、准确性和快速性均优于其它优化算法。

(4) 利用永磁无刷直流电机控制系统台架试验平台，对优化算法结合 PID 控制进行了多组对照试验。试验结果与仿真试验结果基本一致，并且在增加外界负载时，PID 控制下的永磁无刷直流电机的转速几乎不受影响，始终稳定维持目标转速。这表明本课题研究的多策略融合改进蜣螂优化算法整定 PID 控制参数在实际应用中具有优秀的性能。

关键词：微型纯电动汽车，轮毂电机，蜣螂优化算法，PID 控制，永磁无刷直流电机

RESEARCH ON THE DRIVE SYSTEM OF MICRO PURE ELECTRIC VEHICLES

ABSTRACT

With the increasingly severe global ecological environment issues and the rapid development of new energy technologies, new energy vehicles are becoming increasingly important in the automotive industry. Among the various types of new energy vehicles, micro pure electric vehicles have gained popularity among young consumers due to their advantages such as low energy consumption, compact size, and easy operation. As a result, the research on the drive system of micro pure electric vehicles has become one of the focuses in the field of new energy vehicles, among which the study of wheel hub motors for micro pure electric vehicles is particularly crucial. This paper aims to improve the reliability and stability of the drive motor for micro pure electric vehicles by combining an improved optimization algorithm with PID control.

This paper proposes a multi-strategy improved dung beetle optimization algorithm to achieve more precise control of the wheel speed in a four-wheel hub motor-driven micro pure electric vehicle. First, a simulation model of the micro pure electric vehicle was established based on theoretical analysis and mathematical models. Subsequently, mathematical and simulation models were developed for the permanent magnet brushless DC motor used in the experiments. Finally, the driving and control requirements of the hub motor were clarified through simulation experiments. In terms of algorithm design, multiple algorithms

were compared and improved. Under the same experimental conditions, the ability of various metaheuristic algorithms to optimize PID control parameters was compared. The simulation results show that the PID control based on the zxyDBO can significantly reduce the motor's rise time and settling time, improve system stability, and reduce the maximum overshoot during motor speed changes. This indicates that the zxyDBO has higher control accuracy and superior response performance in PID control optimization.

The main research contents and results are as follows:

(1) By analyzing the working principles of the four-wheel hub motor-driven micro pure electric vehicle and the mathematical models of its various modules, a complete vehicle model was constructed. The consistency between the simulated driving speed and the preset target speed was tested under different operating conditions, and the correctness and feasibility of the vehicle model were verified through data analysis.

(2) The working principles and basic structure of the permanent magnet brushless DC motor were elaborated, and a Simulink simulation model was established based on its mathematical model. The simulation results were calculated and compared to verify whether the model met the experimental requirements.

(3) The application of various metaheuristic algorithms in optimizing the control parameters of the permanent magnet brushless DC motor was studied, and the performance of each algorithm in optimizing PID control parameters was compared. The results show that the zxyDBO for tuning PID control parameters outperforms other algorithms in terms of system stability, accuracy, and response speed.

(4) A permanent magnet brushless DC motor control system test bench was used to conduct multiple sets of comparative experiments on the

optimized algorithm combined with PID control. The experimental results were consistent with the simulation results. Moreover, the speed of the permanent magnet brushless DC motor under PID control remained stable at the target value even when external load was added. This demonstrates that the PID control parameters tuned by the zxyDBO exhibit excellent performance in practical applications.

KEY WORDS: Micro pure electric vehicle, hub motor, dung beetle optimization algorithm, PID control, permanent magnet brushless DC motor

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
目 录.....	VI
插图清单.....	IX
表格清单.....	XI
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究的背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 新能源汽车的国内外研究现状.....	3
1.2.2 轮毂电机驱动技术的国内外研究现状.....	4
1.2.3 优化算法的国内外研究现状.....	6
1.3 本文主要研究内容及章节安排.....	7
1.3.1 研究内容.....	8
1.3.2 章节安排.....	8
第 2 章 微型纯电动汽车建模与仿真.....	10
2.1 引言.....	10
2.2 微型纯电动汽车系统结构与工作原理.....	10
2.2.1 微型纯电动汽车的系统结构.....	10
2.2.2 微型纯电动汽车的工作原理.....	11
2.3 微型纯电动汽车仿真模型的建立.....	12
2.3.1 微型纯电动汽车动力学模型.....	12
2.3.2 电池模型.....	14
2.3.3 整车模型.....	15
2.4 微型纯电动汽车仿真结果和分析.....	16
2.5 本章小结.....	18
第 3 章 永磁无刷直流电机建模与仿真.....	20

3.1 引言.....	20
3.2 永磁无刷直流电机的结构与原理.....	20
3.2.1 永磁无刷直流电机的基本结构.....	20
3.2.2 永磁无刷直流电机的驱动原理.....	21
3.3 永磁无刷直流电机仿真试验.....	22
3.3.1 永磁无刷直流电机数学模型.....	22
3.3.2 永磁无刷直流电机仿真模型.....	25
3.3.3 永磁无刷直流电机仿真结果与分析.....	27
3.4 本章小结.....	30
第 4 章 蛱螂优化算法优化 PID 参数的研究	31
4.1 引言.....	31
4.2 元启发式算法.....	31
4.2.1 元启发式算法简介.....	31
4.2.2 灰狼优化算法.....	32
4.2.3 蝴蝶优化算法.....	35
4.2.4 鲸鱼优化算法.....	38
4.3 多策略融合改进蛱螂优化算法.....	41
4.3.1 蛱螂优化算法.....	41
4.3.2 反向学习策略.....	45
4.3.3 佳点集.....	46
4.3.4 正余弦算法.....	47
4.4 验证改进蛱螂优化算法的优越性.....	48
4.5 多种算法整定 PID 控制参数仿真实验	51
4.6 本章小结.....	54
第 5 章 轮毂电机驱动系统台架试验.....	56
5.1 引言.....	56
5.2 台架试验设备.....	56
5.3 台架试验设计.....	59

5.3.1 台架试验原理.....	59
5.3.2 台架步骤设计.....	61
5.3.2 上位机试验操作流程.....	62
5.4 永磁无刷直流电机台架试验.....	63
5.4.1 台架对照试验（200rpm）	63
5.4.2 台架对照试验（500rpm）	65
5.4.3 台架对照试验（1000rpm）	67
5.4.4 台架试验结论.....	68
5.5 本章小结.....	69
第 6 章 结论与展望.....	70
6.1 课题总结.....	70
6.2 未来展望.....	71
参考文献.....	73
攻读学位期间取得的成果及参研项目	81
致谢.....	82

插图清单

图 1-1 全球新能源汽车历年销量情况	1
图 1-2 中国新能源汽车历年销量及增速情况	2
图 2-1 四轮驱动轮毂电机微型纯电动汽车系统	11
图 2-2 微型纯电动汽车驱动控制系统简图	12
图 2-3 微型纯电动汽车动力学仿真模型	13
图 2-4 微型纯电动汽车电池模块仿真模型（左侧）	15
图 2-5 微型纯电动汽车整车模型	15
图 2-6 整车模型仿真结果	17
图 2-7 工况要求速度与汽车行驶速度对照图	17
图 2-8 轮毂电机转速仿真图	18
图 3-1 永磁无刷直流电机结构简图	20
图 3-2 线圈绕组磁场示意图	22
图 3-3 永磁无刷直流电机 Simulink 模型	26
图 3-4 开环控制的电机转速波形图	27
图 3-5 预设 PID 控制参数的电机转速波形图	28
图 3-6 开环控制与预设 PID 控制参数的电机转速波形比较图	28
图 3-7 开环控制的电机转矩波形图	29
图 3-8 预设 PID 控制参数的电机转矩波形图	29
图 3-9 永磁无刷直流电机 MAP 图	30
图 4-1 灰狼优化算法逻辑流程图	35
图 4-2 蝴蝶优化算法逻辑流程图	38
图 4-3 鲸鱼优化算法逻辑流程图	41
图 4-4 蜣螂优化算法逻辑流程图	45
图 4-5 各种元启发式算法的标准测试函数比较图	49
图 4-6 1000rpm 电机转速变化曲线	53
图 5-1 永磁无刷直流电机试验系统	56

图 5-2 永磁无刷直流电机试验台架	57
图 5-3 试验台架系统结构图	59
图 5-4 PID 控制模型	59
图 5-5 轮毂电机控制模型	60
图 5-6 永磁无刷直流电机台架试验原理图	61
图 5-7 上位机调试数据修改界面	62
图 5-8 开环控制目标转速 200 转的实物电机转速图像	64
图 5-9 PI 控制目标转速 200 转的实物电机转速图像	65
图 5-10 开环控制目标转速 500 转的实物电机转速图像	66
图 5-11 PI 控制目标转速 500 转的实物电机转速图像	66
图 5-12 PI 控制目标转速 1000 转的实物电机转速图像	67
图 5-13 PID 控制目标转速 1000 转的实物电机转速图像	68

表格清单

表 1-1 各类型新能源汽车的特点	2
表 2-1 驱动方式参考指标对比	11
表 2-2 整车参数	16
表 3-1 永磁无刷直流电机参数	27
表 4-1 标准测试函数	49
表 4-2 各算法优化对应各基准测试函数的适应度值均值比较	50
表 4-3 各算法优化对应各基准测试函数的适应度值标准差比较	51
表 4-4 不同改进策略求出的对应参数	52
表 4-5 电机转速 1000rpm 下整定 PID 评价	52
表 5-1 实物电机参数	58
表 5-2 扭矩传感器参数	58
表 5-3 试验所用控制参数表	63
表 5-4 目标转速 200rpm 下控制效果评价	64
表 5-5 目标转速 500rpm 下控制效果评价	65
表 5-6 目标转速 1000rpm 下控制效果评价	67

第 1 章 绪论

1.1 研究的背景与意义

在当今社会，汽车仍然是交通领域不可或缺的载人工具。然而，随着世界能源危机日益严峻，致力保护环境和节约能源已成为社会发展的重要方向。与传统燃油汽车相比，新能源汽车凭借其不再依赖汽油和低碳环保的优势，成为了目前汽车行业的主要研究热点。据预测，到 2030 年，纯电动汽车将成为乘用车市场的主导力量^[1]。全球新能源汽车历年销量情况如图 1-1 所示。

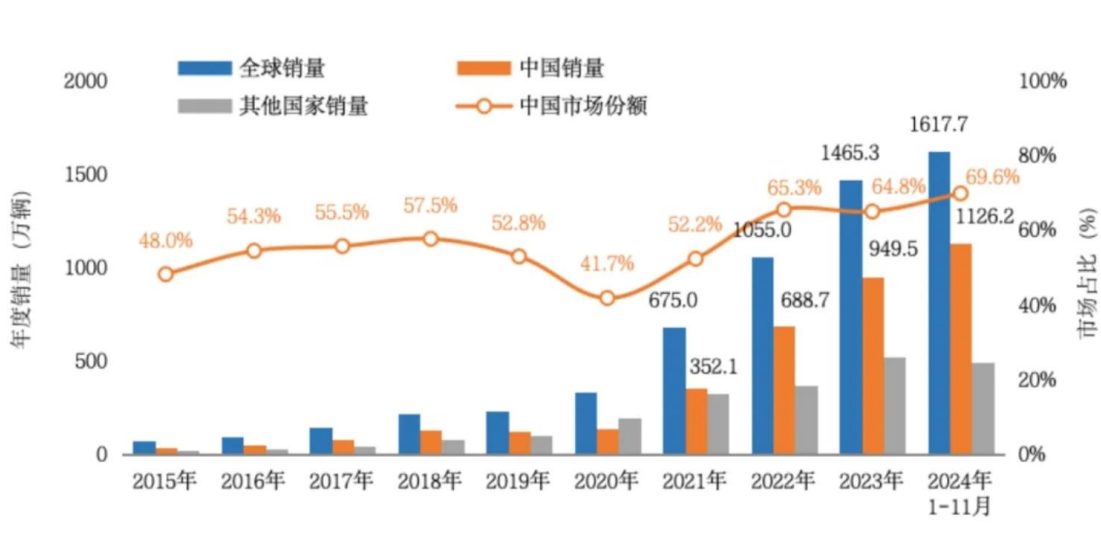


图 1-1 全球新能源汽车历年销量情况

近年来，新能源汽车行业迈入了以市场为核心的发展新阶段。从市场渗透率来看，中国乘用车市场的新能源汽车从 2017 年的 2.4% 大幅提升至 2021 年的 16%，这显示出消费者对新能源汽车的认可度越来越高。从市场销量来看，中国新能源汽车的年销售量从 2010 年的不足万辆增长到 2021 年的 330 万辆，稳居全球新能源汽车市场的前列。特别是在刚过去的 2022 与 2023 年，中国一跃成为名列世界前茅的新能源出口大国，并在去年创下出口新高。随着全世界对新能源汽车的关注度持续升温，其背后的经济潜力也越发引人注目。我国新能源汽车历年销量及增速情况如图 1-2 所示。



图 1-2 中国新能源汽车历年销量及增速情况

如今，新能源汽车市场上的电动汽车种类繁多，各具特色，每种类型都有自己的优缺点，具体情况如表 1-1 所示。插电式混合动力汽车虽然省油，但电池寿命短、续航里程有限；增程式电动汽车启动安静、加速快，却在高速行驶时动力损失明显；燃料电池汽车寿命长、污染小、能量转化效率高，但能量成本高且加注复杂；油电混动汽车尽管技术成熟，但价格高、依赖燃油，仍存在污染问题。

表 1-1 各类型新能源汽车的特点

汽车类型	优点	缺点
插电式混合动力汽车	省油	电池寿命较短
增程式电动汽车	行驶安静，提速快	高速路况有动力浪费，油耗大
燃料电池汽车	无排放，能量转换效率高	氢气成本高，加注过程复杂
油电混动汽车	混合动力	价格高，污染大
微型纯电动汽车	结构简单，零污染，能耗低，转换效率高，价格低	虽存在续航里程问题，但预测未来可解决

相比之下，微型纯电动汽车凭借着结构简单、体积小、重量轻、整体电能转换效率高、能源价格低、零污染、低能耗以及价格经济实惠等优点，成为许多家庭的首选。它不仅经济实用，还安静舒适，非常适合城市日常代步。

为了满足日常出行的需要，作为城市代步的微型纯电动汽车受到大众青睐。相较于传统电动汽车的驱动形式，采用四轮轮毂电机驱动的微型纯电动汽车省去

了复杂的传动系统，直接将电机与车轮集成，电机驱动车轮的方式。具有电控性能优越、结构紧凑、动力传递效率高等优势。正因如此，微型纯电动汽车备受国内外汽车业的关注。因此，四驱轮毂电机驱动的微型纯电动汽车是值得深入研究并且非常具有潜力的新能源汽车。

1.2 国内外研究现状

在全球能源紧缺与积极响应低碳生活的大背景下，新能源汽车的价值被越来越多的国家重视，并被深入研究与开发^[2-3]。在全球范围内，新能源汽车的市场规模和渗透率都在快速增长。据 Clean Technica 数据显示，2023 年全球新能源车销量创历史新高，突破 1300 万辆大关，同比增长 35.7%，其需求主要集中在欧洲和美国，而一些新兴市场如越南和泰国的需求增长也有所加快。高工产业研究院曾预测，2024 年全球汽车电动化渗透率将攀升至 20%，全球新能源汽车销量有望高达 1800 万辆。在新能源市场规模和渗透率高速发展的同时，新能源汽车在技术领域，如电池技术、驱动技术、自动驾驶等都取得了显著进展。特别是固态电池技术，因其高能量密度和安全性，被认为是下一代电池技术的核心。

近些年，中国新能源汽车市场表现尤为突出，新能源汽车的保有量已达 2041 万辆，2023 年产销量分别达到 492.9 万辆和 494.4 万辆，同比增长 30.1% 和 32%。中国在“三电”系统（电池、电机、电控）方面取得了突破性进展，特别是在电池技术领域，中国企业占据全球动力电池销售市场的半壁江山。通过技术创新和规模化生产，中国新能源汽车在成本控制上实现了重大突破，高端技术如 800V 平台架构、8295 车规级芯片等得以在 20 万元以内的车型中，极大地促进了新能源汽车的普及。

传统化石能源的污染问题日益严重，其碳排放量占全球总排放量的 20% 以上，而化石能源在全球能源消耗中的占比仍超过 95%^[4]。相比之下，新能源汽车以电能、氢能等可再生能源为动力，有效避免了传统燃油车的污染排放问题，因此成为全球范围内最具潜力的燃油车替代品之一^[5-7]。

1.2.1 新能源汽车的国内外研究现状

本课题所研究的微型纯电动汽车具有电控性能优越、结构紧凑、动力传递效率高等独特优势，国内外许多学者已对此展开了相关研究。例如，Olschewski 等

人^[8]针对微型纯电动汽车的后桥设计,通过调整扭力梁轴的安装方向,为电池创造了额外的封装空间,并引入新算法对弹性运动学行为进行建模,最终优化了多连杆扭力轴的性能。Kim 等人^[9]利用 GPS 数据分析微型纯电动汽车的出行特性,发现其在特定道路上具有良好的性能和经济价值。Mohammed 等人^[10]基于响应面法优化了微型纯电动汽车的多目标人机工程设计模型,采用 RSM 确定了最优尺寸,在不影响空间效率的前提下提高了车辆的实用性。黄恒等人^[11]针对微型纯电动汽车换挡时可能出现的动力中断、换挡冲击和换挡时间长等问题,设计了一套换挡系统,并通过 Simulink 模型搭建与控制策略仿真实验,验证了其控制策略的有效性和准确性。何卫等人^[12]针对微型纯电动汽车续航里程与电池特性的不足,通过对电池、电驱系统效率和整车设计等参数进行续航敏感度分析,提出了提高续航里程的高性价比技术路径。陈瑛^[13]以微型纯电动汽车电机控制器的强迫风冷散热器为研究对象,引入模拟热源解决了功率器件堵转工况测试中结温特性对实验的影响,为散热器的性能分析与优化设计提供了依据。Johansson 等人^[14]基于电动汽车模型热管理系统的设计与评价,开发了一种基于模型的仿真工具,用于联合评估和控制先进的热管理系统。Cai 等人^[15]针对电动汽车储能的频率响应与电网波动性问题,提出了一种强不确定性模型,通过整理时空特性和储能资源数据,提高了模型的稳定性。Srinivasan 等人^[16]研究了一种基于深度学习模型的电动汽车能量管理系统生物启发优化器,通过结合深度学习模型与生物启发优化算法,提升了电动汽车性能并延长了电池寿命。Mazumdar 等人^[17]基于 GWO-ANFIS 控制器对并网型电动汽车进行了研究,结果表明该控制器显著提升了电动汽车的可靠性和充电效率。Chang 等人^[18]针对电动汽车系统的纯正弦波逆变器,提出了一种基于 FMGM 的高效纯正弦波逆变器 FTA 设计控制方法,实验证明其在收敛速度、计算效率和消除谐波畸变等方面优于传统的 TA 控制方法。

综上所述,新能源汽车在全球范围内呈现出快速发展的趋势,相关研究已成为汽车领域的重点。特别是在中国,新能源汽车的保有量和技术创新都走在世界前列。所以,进一步深入研究和开发新能源汽车是当前的重中之重,势在必行。

1.2.2 轮毂电机驱动技术的国内外研究现状

为满足城市通勤需求,微型纯电动汽车逐渐成为关注的焦点。其中,由四轮

轮毂电机驱动的微型纯电动汽车将电机与车轮直接集成,省去了差速器等传统传动部件^[19]。这种设计凭借其优越的电控性能、紧凑的结构以及高效的动力传递效率,在国内外汽车行业中引起了广泛关注。基于这些优势,本文研究的对象展现出相当大的潜力和前景,具备进一步研究的价值。

在控制技术方面,学者们针对轮毂电机驱动车辆的不同问题提出了多种解决方案。Wang^[20]设计了一种自适应高阶滑膜(HOSM)控制器,采用自适应模糊逻辑系统对悬架进行建模,并通过 Lyapunov 函数实现自适应切换增益,有效抑制了滑模控制的抖振问题。薛红涛等人^[21]针对四轮毂驱动电动汽车的局部电机故障问题,提出了一种基于模型预测控制-多系统协同分配(MPC-MSCA)的容错控制方法,显著提升了故障工况下的操作稳定性。Zhang 等人^[22]提出了一种运动稳定性与轮胎打滑协调控制策略,通过非线性轮胎特性和车轮旋转运动的综合估算方法实现优化控制。Yoon 等人^[23]利用磁流变减振器对轮毂电机驱动汽车悬架系统进行自适应控制,验证了其良好的减震效果。Ito 等人^[24]提出了基于广播控制的自主分布式制动与驱动力控制架构,适用于四轮轮毂电机驱动车辆,实现了固定场景下的自治分布式控制。张海川等人^[25]针对轮毂电机驱动电动汽车的四轮转向(4WS)和直接横摆力矩控制(DYC)提出了新型协调控制策略,显著提高了极端工况下的路径跟踪精度和操纵稳定性。付翔等人^[26]则对驱动力控制策略进行综合优化,进一步提升了车辆的稳定性和动力性。

在四轮驱动研究上,学者们提出了多种创新策略。Chen 等人^[27]利用相平面技术,优化了一种新型四轮独立动力系统,具备扩展协调控制功能。Silva 等人^[28]针对四轮独立驱动(FWID)电动汽车,提出了一种模糊逻辑控制(FLC)方法,通过计算和遗传算法优化了车辆稳定性控制参数。Saleeb 等人^[29]开发了一种基于人工神经网络的直接转矩控制驱动方案,在提高驱动效率的同时降低了磁芯损耗。Ao 等人^[30]基于自适应滑模控制(ASMC)策略,结合模型预测控制分配(MPCA)方法,显著提升了四轮驱动电动汽车的横向稳定性。Dhamija 等人^[31]提出了一种基于非线性模型预测控制(NMPC)的扭矩矢量控制方案,进一步优化了四轮驱动电动汽车的性能。Guo 等人^[32]设计了一种兼顾车辆性能和能耗效率的扭矩分配策略,为四轮驱动电动汽车提供了更高效的能源利用方案。Wang 等人^[33]提出了

一种基于模糊逻辑控制的扭矩分配与能量管理方法,进一步提升了车辆的动力性能。Lee 等人^[34]开发了一种自适应非奇异快速终端滑模控制方法,用于直接横摆力矩控制,有效提高了车辆的安全性和稳定性。Lian 等人^[35]提出了一种分层架构的横摆力矩控制策略,包括横摆运动生成层和纵向力分配层,并深入分析了轮胎受力极限。Yu 等人^[36]提出了一种自适应非奇异快速积分终端滑模容错控制 (ANFITSMFTC) 策略,显著提升了四轮独立驱动电动汽车在轮毂电机未知故障情况下的操纵稳定性。

在 PID 控制领域,研究者们通过多种创新方法优化了电机控制性能。Xu 等人^[37]提出了一种 ALSSA-PID 控制算法,用于四轮驱动电动汽车的电机控制系统,实验证明该算法显著提升了控制性能。Muqet 等人^[38]提出了一种基于元启发式优化的 PID 控制器算法,实验表明其具有更强的鲁棒性和稳定性。曲萍萍等人^[39]针对永磁同步电机 (PMSM) 控制,提出了一种自整定分数阶 PID 控制策略,应用于速度环控制,有效提高了电机的控制性能和鲁棒性。侯佳锐等人^[40]为提升永磁同步电机在节能地铁中的应用效果,设计了一种基于模糊 PID 的转速控制方法,实验显示该方法具有优异的抗干扰能力。朱嵘涛等人^[41]结合模糊控制理论,提出了一种模糊自适应 PID 算法用于直流电机控制,与传统 PID 和模糊 PID 相比,其转速曲线更平滑、调节时间更短、超调量更小,实时性和鲁棒性更优,能够满足工业控制需求。Rohan 等人^[42]通过弱磁 IPMSM 调谐优化了 PID 控制器,进一步提高了响应性能。George 等人^[43]设计并实现了一种用于永磁无刷直流 (BLDC) 电机速度控制的优化分数阶 PID 控制器 (FOPID),显著增强了控制效果。Dutta 等人^[44]提出了一种基于“灰狼优化”(GWO) 算法的 PID 控制器参数优化方法,取得了良好的实验结果。

1.2.3 优化算法的国内外研究现状

近年来,灰狼优化算法、麻雀搜索算法、鲸鱼优化算法等元启发式优化算法在各领域和行业得到了广泛应用,并取得了显著效果。特别是在电机参数优化方面,这些算法能够对电机控制参数进行迭代搜索和优化,不仅保证了电机的快速性、稳定性和准确性,还能提升电机的扭矩输出,从而显著提高电机的响应速度。通过元启发式优化算法对四轮轮毂驱动电机的 PID 控制参数 (K_p 、 K_i 、 K_d)

进行整定,从而达到 PID 控制算法对四轮轮毂驱动电机更好的控制效果。元启发式优化算法在电机控制问题中展现了优异的性能和高质量的控制效果。

近些年,优化算法得到发展极其迅速,各种算法不断涌现。其中灰狼优化算法(GWO),蝴蝶优化算法(BOA),鲸鱼优化算法(WOA),蜣螂优化算法(DBO)表现尤为突出。灰狼优化算法(GWO)是一种新颖的元启发式算法,由澳大利亚格里菲斯大学学者 Mirjalili 等人^[45]于 2014 年提出的一种群智能优化算法,该算法将搜索空间中的解看作是灰狼个体,通过模拟灰狼的等级制度和狩猎行为来寻找最优解。但是其位置更新公式陈旧,生成下一代种群的方式过于普通。蝴蝶优化算法(BOA)由 Arora 在 2015 年提出^[46],但是算法本身的求解能力受算法参数限制较大,需要较好且准确的初始设置,其搜索速度相较于其它算法也较慢。鲸鱼优化算法(WOA)亦由澳大利亚格里菲斯大学学者 Mirjalili 在 2016 年提出^[47],虽然该算法求解易陷入局部最优的不良循环,但是其优点是算法需要确定的参数少,具有良好并且准确的解。蜣螂优化算法(DBO)是由东华大学 Xue 在 2022 年底提出^[48],其独特的种群结构通过不同的生存行为和种群间的经验交互来获取有利的位置信息,这种结构使其在实际应用中表现出更好的效果。

在算法改进方面,许多研究者提出了多种优化方法。例如,吉如沁等人^[49]结合 Tent 映射、自适应惯性权重和飞行来优化蜣螂优化算法。赵强等人^[50]利用改进的具有 Tent 映射的蜣螂优化算法对永磁同步电机的参数进行了优化。孙仟硕等人^[51]使用圆序列和透镜成像策略,并结合柯西-高斯编译策略来改进蜣螂优化算法。潘劲成等人^[52]使用正弦算法、混沌映射和变异量子的组合来改进蜣螂优化算法。此外, Li 等人^[53]通过引入变分模态分解,使改进后的蜣螂优化算法能够更准确地检测电能质量扰动信号。Wang^[54]等人综合 sine 混沌映射、OsPree 优化算法和自适应 T 分布动态选择策略对蜣螂优化算法进行改进。Fu^[55]等人则通过融合 SPM 混沌映射、黄金正弦策略和自适应高斯-柯西混合变异扰动,成功改进了 IDBO 算法。

1.3 本文主要研究内容及章节安排

本课题以微型纯电动汽车主要研究对象,重点探究不同优化算法对 PID 控制参数的优化效果。通过融合多策略改进蜣螂优化算法,并将其应用于 PID 参数

整定中，以提升控制性能。具体研究内容和章节安排如下。

1.3.1 研究内容

本文的研究主要围绕基于 $zxyDBO$ -PID 控制算法的微型纯电动汽车驱动系统展开。首先，以永磁无刷直流电机为研究对象，进行了不同工况下的模拟运行试验。其次，基于多种元启发式算法，将其与微型纯电动汽车驱动系统相结合，通过分析瞬态响应指标数据，研究不同优化算法对 PID 控制效果的影响。最后，通过轮毂电机驱动系统台架试验，对比不同优化算法结合 PID 控制的仿真结果与上位机实际读取的数据，验证了 $zxyDBO$ -PID 控制算法的可行性、正确性和优越性。

1.3.2 章节安排

第 1 章：绪论。本章主要介绍微型纯电动汽车驱动系统的研究背景。通过查阅和整理相关文献，对微型纯电动汽车的控制策略及其发展趋势进行简要概述，并对国内外相关领域的研究进展进行系统梳理。重点围绕新能源汽车、轮毂驱动电机以及蜣螂优化算法的研究现状及其存在的问题展开分析，进而提出本文的研究思路。

第 2 章：微型纯电动汽车的建模与仿真。本章构建微型纯电动汽车的整车模型。通过目标工况下汽车预设的模拟行驶速度情况与仿真结果中的汽车仿真行驶的速度进行对比，证明本文搭建的整车模型的正确性。

第 3 章：永磁无刷直流电机建模与仿真。本章对永磁无刷直流电机工作原理和基本结构进行了阐述，基于永磁无刷直流电机的数学模型、工作原理和基本结构搭建了永磁无刷直流电机的仿真模型。通过分析仿真结果，证明搭建的永磁无刷直流电机仿真模型可以满足实验需求。

第 4 章：蜣螂优化算法优化 PID 参数的研究。本章主要对各种元启发式算法以及永磁无刷直流电机的控制参数优化进行了研究。首先介绍了四种用于对比的元启发式算法，并详细阐述了 $zxyDBO$ 的改进方法、作用阶段及其改进的优越性。随后，将四种元启发式算法与 $zxyDBO$ 分别应用于相同实验环境和条件下的永磁无刷直流电机仿真模型，获取相应的仿真数据和结果。通过对仿真数据及结果的分析，验证了 $zxyDBO$ 在优化性能上的优越性、可行性和正确性。

第 5 章：轮毂电机驱动系统台架试验。本章通过永磁无刷直流电机控制系统台架试验平台，对 PID 控制的可行性和有效性进行了多组对照试验验证。试验结果表明，zxyDBO 在优化 PID 控制器和 PI 控制器方面具有显著效果，进一步证明了本课题研究内容在实际应用中的有效性和可行性。

第 6 章：总结与展望。本章对全文内容和结论进行了总结，概括了各章节的研究内容及完成的工作，并对本文的研究结果进行了归纳和分析。同时，指出了研究中存在的不足，并对后续相关研究领域的发展方向进行了展望。

第 2 章 微型纯电动汽车建模与仿真

2.1 引言

随着新能源汽车工业的快速发展和控制技术的不断进步,新能源汽车的精确建模显得尤为重要。在设计过程中,构建准确的新能源汽车数学模型是关键步骤之一。通过数学、电磁学和力学分析,新能源汽车建模能够描述系统的动态特性,帮助我们深入理解系统的工作原理和基本结构,预测系统的响应和性能,并为控制算法的设计奠定基础。精确的数学模型能够为控制系统的分析和优化提供支持,从而提升汽车的操控性能和行驶安全性。

本章首先介绍了微型纯电动汽车的组成部分及其对应的数学模型,并基于工作原理建立了相应的数学模型,推导出微型纯电动汽车的运动学方程、电路方程以及转矩等计算模块的方程。随后,结合各模块的数学模型及相关参考文献和网络资料,在 Simulink 环境下搭建了四轮轮毂电机驱动微型纯电动汽车的仿真模型。整车模型的各项参数在 Matlab 中进行定义,并在 CYC_NEDC 工况下进行了联合仿真试验。通过对比目标工况下预设的模拟行驶速度与仿真结果中的实际行驶速度,验证了仿真模型的准确性。最后,对建立的联合仿真模型进行了有效性分析。

2.2 微型纯电动汽车系统结构与工作原理

2.2.1 微型纯电动汽车的系统结构

传统的汽车驱动系统由电动机、主减速器、差速器和车轮组成。但是,传统汽车驾驶员存在动力不足的问题,无法支持车辆的整体质量。Hang 等学者^[56]通过对比传统传动方式与分布式传动方式的机械结构,发现分布式驱动在电动汽车的驱动和转向方面具有显著优势,并进一步简化了机械结构,提升了传动效率。此外,轮毂电机驱动的精准控制能力也有助于增强车辆的行驶稳定性。而四轮轮毂电机驱动电动汽车在四个车轮上都配备了独立的轮毂电机,大大提高了车辆的整体动力和每个车轮的独立动力,提高了车辆稳定性,减少了不必要的机械结构,因此其能量传递仅发生在电池和功率设备之间^[57]。表 2-1 对比了不同驱动方式的

特点。

表 2-1 驱动方式参考指标对比

参考指标	集中式	分布式轮边电机	分布式轮毂电机
动力学特性	中	优	优
传动效率	中	良	优
质心高度	中	较低	较低
传动链长度	长	短	短

综上所述，配备轮毂电机的四轮驱动电动汽车具有更高的控制精度、更小的质量和更强的动力。四轮驱动轮毂动车系统如下图 2-1 所示。

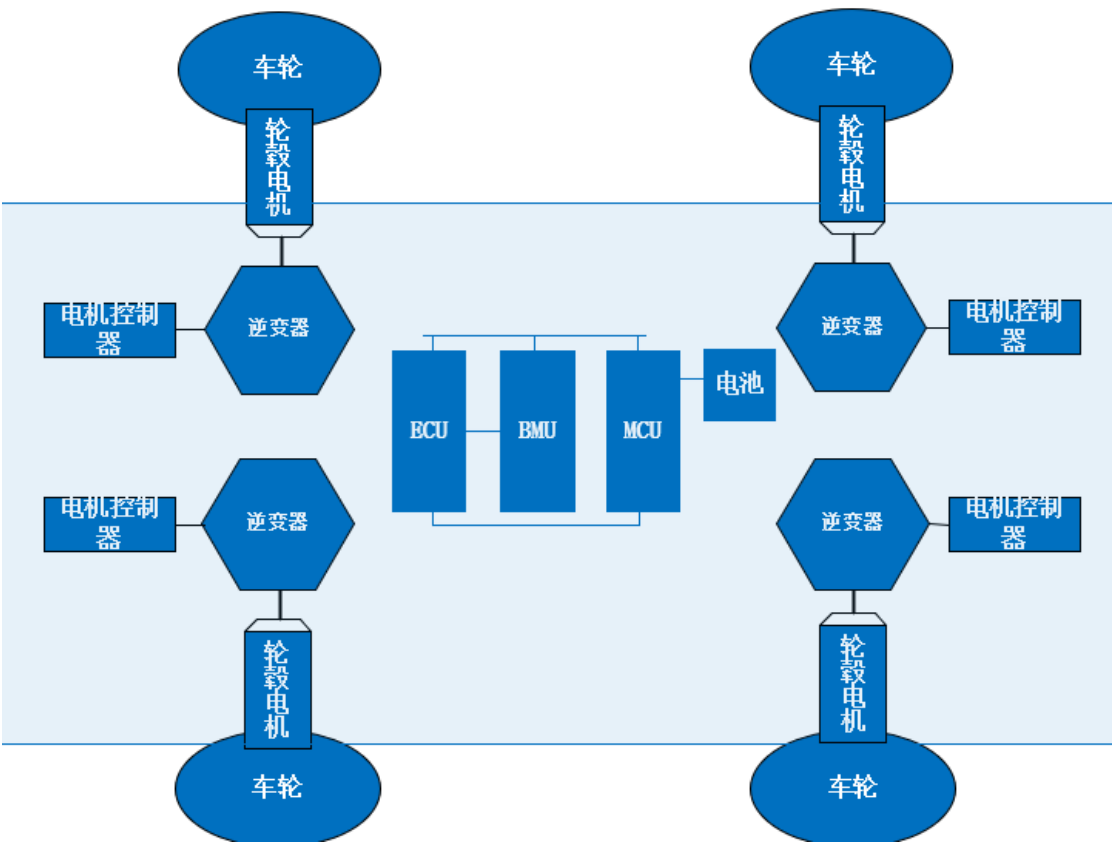


图 2-1 四轮驱动轮毂电机微型纯电动汽车系统

从图 2-1 可以看出，四轮驱动轮毂电机微型纯电动汽车系统结构包括车轮、轮毂电机、逆变器、电机控制器、电池、MCU（微控制器单元）、BMU（电池管理单元）和 ECU（电子控制单元）。

2.2.2 微型纯电动汽车的工作原理

微型纯电动汽车在一定程度上缓解了现今全球能源紧缺的重大问题，非常符

合低碳生活的响应号召，是符合当前时代历史规律的汽车类型。微型纯电动汽车系统构成的主要模块分别是：驱动模块、辅助动力供给模块、电源模块^[58]。四轮轮毂电机驱动微型纯电动汽车工作原理如下：驾驶员适度缓慢踩下加速踏板，由人力对汽车发出驱动信号。整车控制系统（由 MCU、BMU 和 ECU 组成）接收并响应信号，将处理后的驱动信号发送至四个轮毂电机。同时，电池为轮毂电机提供电力，使各个电机产生各自的电流和力矩，经由减速器的齿轮传动，降低为合适的转速，最终带动各自的电动车轮进行前进、后退或者转向，从而达到驱动整车运动的目的。本章节所研究的全轮轮毂电机驱动微型纯电动汽车系统结构组成如下图 2-2 所示。

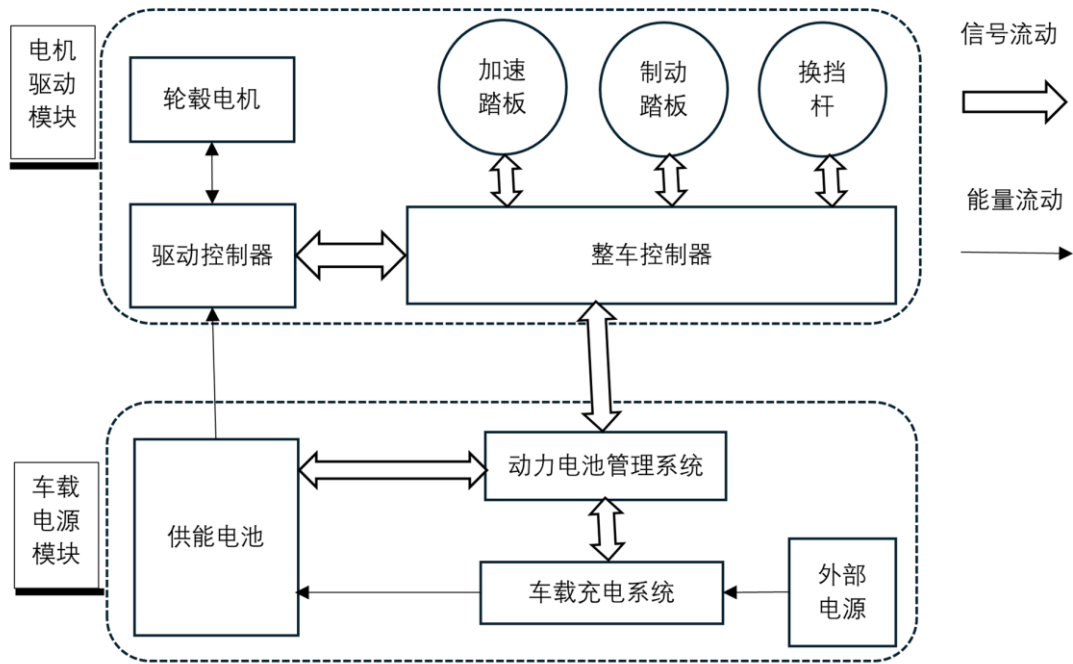


图 2-2 微型纯电动汽车驱动控制系统简图

2.3 微型纯电动汽车仿真模型的建立

2.3.1 微型纯电动汽车动力学模型

根据纯电动汽车在道路上必须克服的阻力以及基于对汽车行驶过程中纵向受力分析^[59-60]，得到汽车的运动方程式为：

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (2-1)$$

式中， F_t 是驱动力， F_f 是滚动阻力， F_w 是空气阻力， F_i 是坡度阻力， F_j 是加速

阻力。

汽车受到的滚动阻力方程式为：

$$F_f = fW \quad (2-2)$$

式中, f 是滚动阻力系数, W 为汽车质量。滚动阻力系数受到路面状况和车速的影响。

汽车受到的空气阻力方程式为：

$$F_w = \frac{C_D A v_a^2}{21.15} \quad (2-3)$$

式中, C_D 为空气阻力系数; A 为汽车的迎风面积; v_a 是汽车的行驶速度。

汽车受到的坡度阻力方程式为：

$$F_i = G \sin \alpha \quad (2-4)$$

式中 α 为坡道的倾斜角度, G 为汽车重力。

汽车受到的加速阻力方程式为：

$$F_j = \delta m \frac{dv_a}{dt} \quad (2-5)$$

式中 δ 为质量比例系数, 电机与轮毂采用刚性连接。

联立式 1、2、3、4、5 得汽车驱动力为式 6 所示：

$$F_t = Wf + \frac{C_D A v_a^2}{21.15} + G \sin \alpha + \delta m \frac{dv_a}{dt} \quad (2-6)$$

式 6 中物理量含义与式 1、2、3、4、5 中一致。

根据式 6 建立图 2-3 所示的微型纯电动汽车动力学仿真模型。

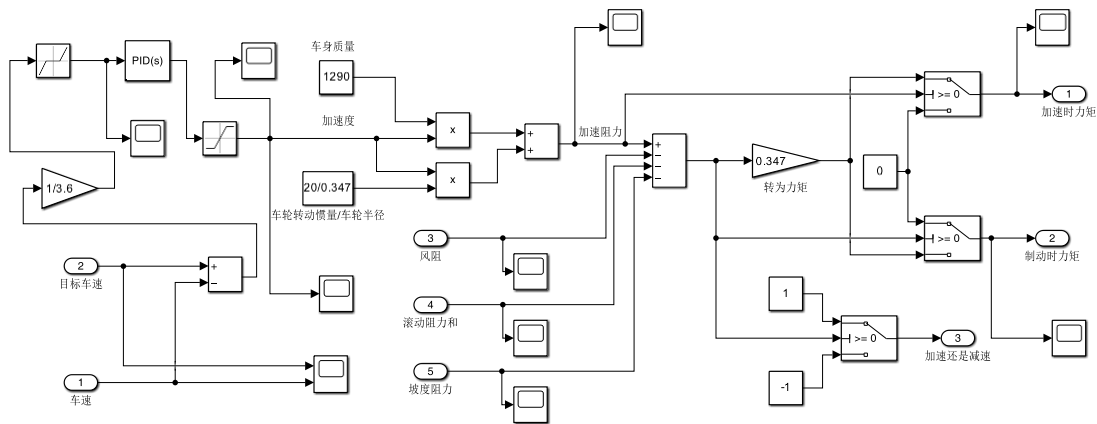


图 2-3 微型纯电动汽车动力学仿真模型

图 2-3 中的加速阻力是通过目标车速与实际车速作差后经过一系列计算得

到。由于机械结构本身的限制是非理想状态下运行必然会有误差，所以实际车速无法和理论车速一致，故而需要进行数个计算模块，求出加速阻力。车速、目标车速、风阻（空气阻力）、滚动阻力、坡度阻力等均由 NI Veristand 与 LabVIEW 结合定义。

2.3.2 电池模型

在选用微型纯电动汽车电池类型时，我们要考虑电池的寿命长短、比能量、比功率、总体电容量、工作时的耐热能力等。现在常见的电动汽车电池类型有：磷酸铁锂电池、空气电池、三元锂电池、铅酸蓄电池、镍氢电池、钠硫电池、二次锂电池。其中三元锂电池电量最大，镍氢电池最稳定，磷酸铁锂电池最安全。本章较为推荐的是磷酸铁锂电池，该电池在确保最佳安全性的同时，具有较长的使用寿命、优异的耐高温性能以及较高的能量密度，因此非常适合应用于微型纯电动汽车^[61]。

电池可以看作是一个理想电压源和一个电阻串联。其电压平衡方程：

$$E = U + IR \quad (2-7)$$

式中， E 为电池的开路电压， U 为电池端电压， I 为电路电流， R 为电池内阻。

电池的能量平衡方程：

$$EI = P_e + I^2 R \quad (2-8)$$

式中， P_e 为电池组功率。

电池的放电功率为：

$$P_q = (E_0 - IR)I \quad (2-9)$$

式中， P_q 为单个电池的输出功率。

单个电池的最大的输出功率为：

$$P_{max} = \frac{2E_0^2}{9R} \quad (2-10)$$

式中， P_{max} 为单个电池最大输出功率。

在充、放电过程中的剩余电池组的荷电状态为：

$$SOC = SOC_0 - \int \frac{idt}{C_m} \quad (2-11)$$

式中， SOC 是电池的荷电状态， SOC_0 为电池初始电量， i 为工作电流， C_m 为电池额定容量。

微型纯电动汽车电池模块仿真模型如下图 2-4 所示。

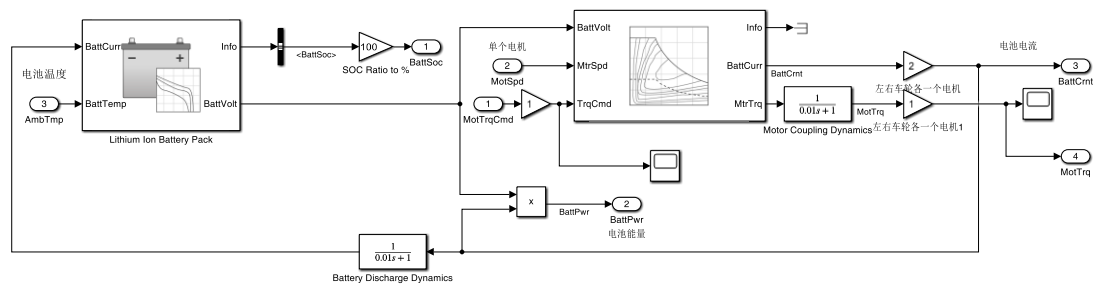


图 2-4 微型纯电动汽车电池模块仿真模型 (左侧)

图 2-4 中左边部分为电池模块仿真模型，包含电池温度、电池电流、电池电压、电池荷电状态。右边部分是电机 map 图，即纵坐标为电机转矩与横坐标为电机转速的图像，具体的电机建模在下一章有详细介绍。

2.3.3 整车模型

整车模型的 Simulink 模型如图 2-5 所示。

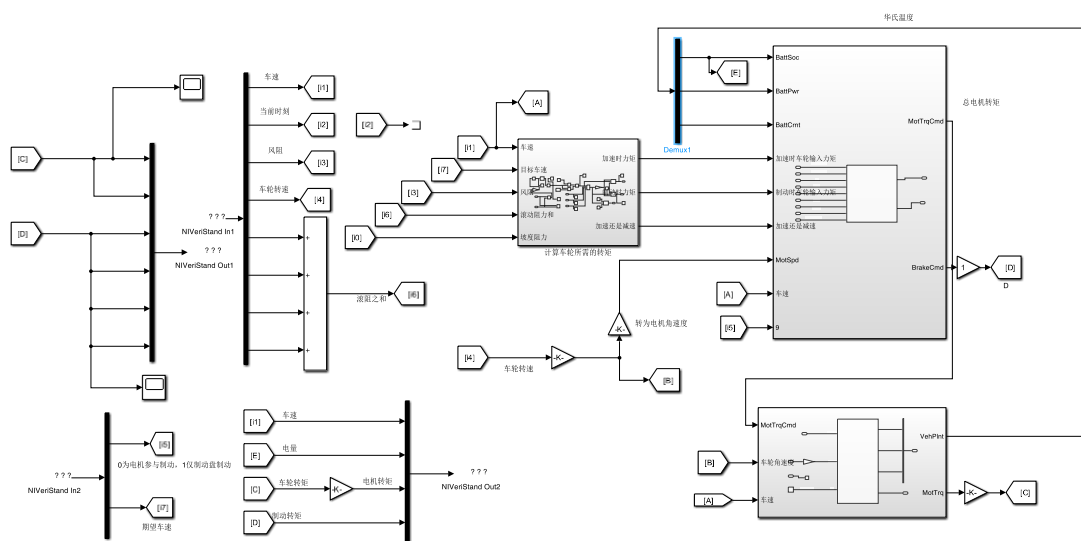


图 2-5 微型纯电动汽车整车模型

图 2-5 包含整车动力学模型、电池模型、电机模型、车轮期望转矩计算模块、电机期望转矩计算模块、制动盘期望转矩计算模块、Veristand 输入输出接口等。动力学模型是汽车行驶的受力情况, 电池模型可以模拟汽车的能量转换与电量消耗, 电机模型具体在下一章节叙述, 计算模块主要的功能是计算电压差、电流差、速度差等一系列数据。

依据汽车之家网站的相应车型数据为参考,微型纯电动汽车整车的参数如表 2-2 所示。

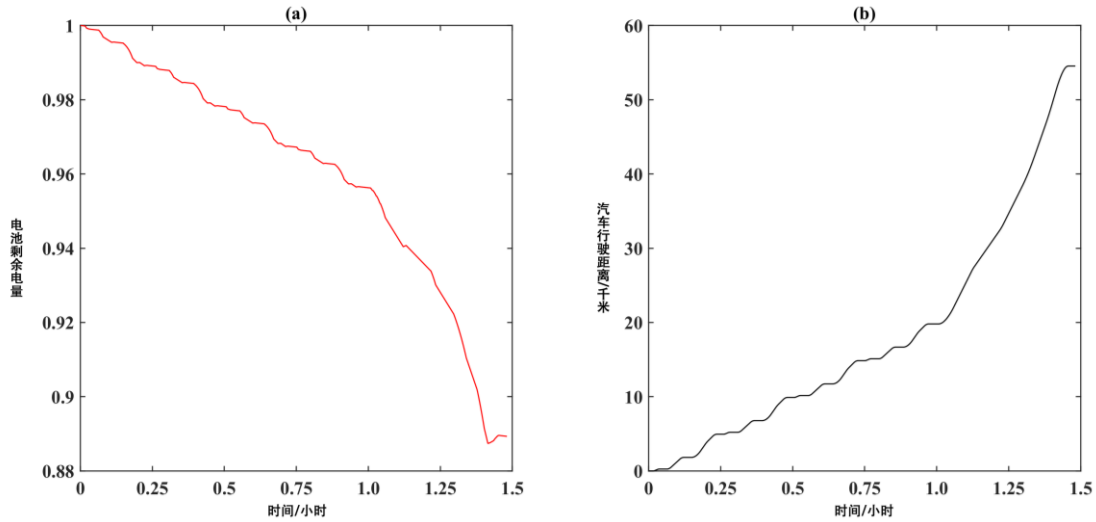
表 2-2 整车参数

参数	数值
整备质量(kg)	665
最大满载质量(kg)	1043
风阻系数	0.3
阻力系数	0.35
滚动阻尼系数(mm)	0.015
轴距(mm)	1940
轮距(mm)	1290
轮胎规格	145/75 R12
最小离地间隙(mm)	125
轮胎半径(m)	0.282
重力加速度 (m/s^2)	9.795 (安徽)
长宽高(mm)	2920*1493*1621
能源类型	纯电动

2.4 微型纯电动汽车仿真结果和分析

本课题研究的微型纯电动汽车主要用于市区乘用，因此采用 CYC_NEDC 工况，NEDC 工况循环（New European Driving Cycle）是由欧洲制定的测试标准，用于评估轻型汽车在特定工况下的排放水平。该工况模拟了城市驾驶中常见的启停、高速行驶、低速行驶、急加速和急减速等行为。

打开 Matlab 软件，输入 Advsiior，可以启动该模拟工况软件。使用其定义纯电动汽车的各项参数，车身、电池、电机、转换器和车轮等一系列参数均设置完毕后，点击 Continue 按钮，进入纯电动汽车运行工况模拟界面。该界面可以观察到纯电动汽车的运行时间、行驶的距离、预设工况下汽车行驶过程中的最大速度以及加速度等一系列数据。随后设置 CYC_NEDC 工况下的参数，例如行驶时间、总循环该工况次数，设置微型纯电动汽车的工况循环次数为 1 次，其电量损耗与行驶距离随时间变化的仿真结果如图 2-6 所示。

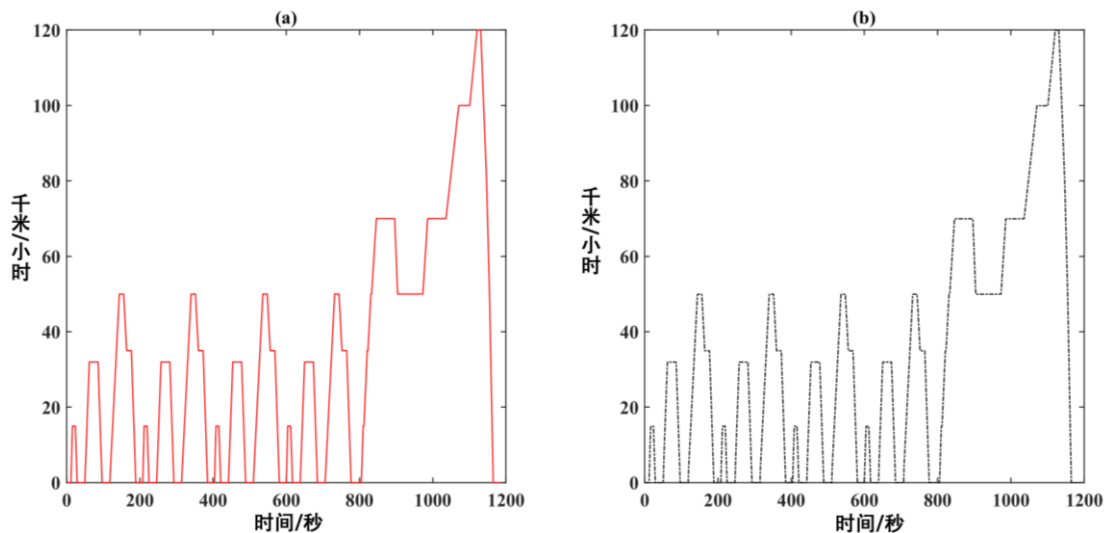


(a) 微型纯电动汽车电池电量变化图像

(b) 微型纯电动汽车行驶里程图像

图 2-6 整车模型仿真结果

图 2-6 反映了一个运行周期内电池电量的变化及相应的行驶里程。研究微型纯电动汽车在规定工况下的运行是否达标，主要是看在该工况下汽车行驶的过程中，实际行驶速度变化是否与目标工况下速度变化要求相同，这可以判断汽车是否按照目标工况条件下正常行驶。图 2-7 反映了汽车行驶速度与工况要求速度的对照。



(a) CYC_NEDC 工况速度变化图

(b) 微型纯电动汽车实际行驶速度变化图

图 2-7 工况要求速度与汽车行驶速度对照图

图 2-7 表明了微型纯电动汽车达到了上述的要求，即四轮轮毂电机驱动的微型纯电动汽车可以提供目标工况下速度的需求。图中的结果说明本章所搭建的四

轮轮毂电机驱动的微型纯电动汽车模型可以达到行驶需求。

在确保电池电量变化与微型纯电动汽车行驶里程一致，以及四轮轮毂电机驱动速度变化符合工况需求的前提下，最终成功验证了轮毂电机的转速达到微型纯电动汽车在目标工况下行驶的要求，并且轮毂电机的转速没有超过上限。轮毂电机的转速与时间的关系如图 2-8 所示。

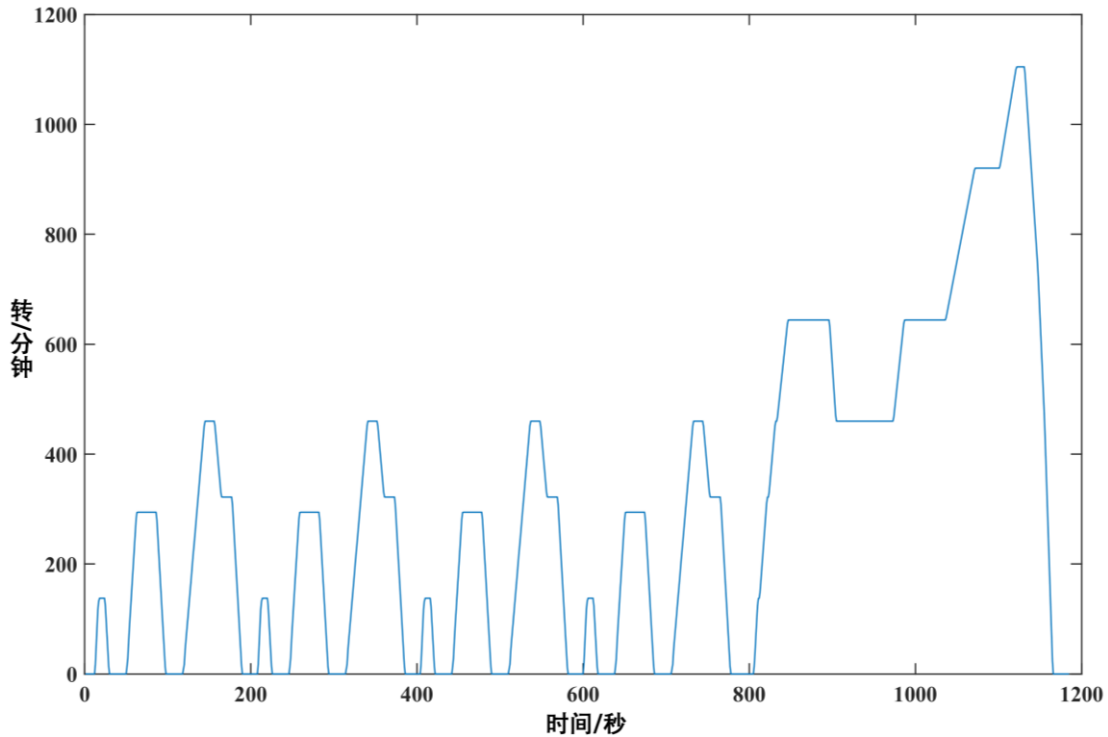


图 2-8 轮毂电机转速仿真图

图 2-8 中的电机运行时最高转速不超过 1200rpm，本课题所使用电机的额定转速约为 2500rpm，故该驱动电机可以提供动能使其驱动的微型纯电动汽车的实际行驶速度按要求变化，其驱动微型纯电动汽车的实际行驶速度满足工况要求，且该轮毂电机的实际转速完全满足微型纯电动汽车的驱动需求。

2.5 本章小结

本章分析了四轮轮毂电机驱动微型纯电动汽车的工作原理，并通过多个模块构建了完整的整车模型，包括微型纯电动汽车动力学模型、电池模型和各种计算模块等。利用各模块的数学模型、相关参考文献和网络文章，在 Simulink 环境下搭建了四轮轮毂电机驱动微型纯电动汽车的仿真模型。整车模型的各项参数在 Matlab 中定义，并在 CYC_NEDC 工况下进行联合仿真试验。通过对比目标工况

下预设的模拟行驶速度与仿真结果中的行驶速度,得出结论:在不同目标工况下,仿真行驶速度能够很好地贴合预设的模拟行驶速度,证明了本章节搭建的整车模型及其各模块具有高度的准确性。这表明本课题成功构建了四轮轮毂电机驱动微型纯电动汽车的整车模型。

第3章 永磁无刷直流电机建模与仿真

3.1 引言

为了实现 PID 控制在永磁无刷直流电机系统中的快速性、准确性与稳定性，首先需要对其内部结构与工作原理进行深入研究和分析。本章将通过搭建永磁无刷直流电机模型，为下一章中优化算法与 PID 控制的结合奠定坚实的理论基础。此外，为了验证所搭建模型的准确性与可靠性，我们将通过仿真实验，分别对开环控制与预设 PID 参数控制的效果进行对比分析。验证本章搭建的永磁无刷直流电机的 Simulink 模型是否正确。

3.2 永磁无刷直流电机的结构与原理

3.2.1 永磁无刷直流电机的基本结构

永磁无刷直流电机是一种采用电子换向技术替代传统机械换向装置的电动机。主要由永磁体、导磁体、定子、转子、定子线圈、电子元器件、传感器、集成电路、电力电子逆变器、转子位置检测器和控制器组成^[62]。与普通直流电机不同，永磁无刷直流电机依靠永磁体生成磁场，并通过调节电枢电压的大小来实现对电机转速的灵活控制。在运行时，控制器启动并且使电机的定子通电，同时将电流调节为特定的矩形波，传感器则用于监测，将电机的实时速度和实时位置反馈给控制器，便于控制器调节电流的相位和大小借此控制电机的转速和转向。

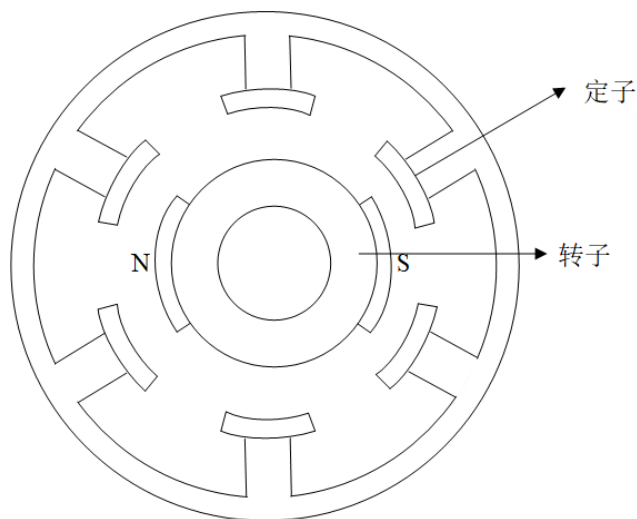


图 3-1 永磁无刷直流电机结构简图

永磁无刷直流电机结构如图 3-1 所示，其核心组成部分包括定子、转子、磁极和磁场。定子位于电机的外壳上，而转子则位于电机内部，同时充当产生磁场的永磁体。通过永磁体形成的磁场，转子在空间中呈现出明确的南北极分布。永磁无刷直流电机通电转动时，三相绕组线圈中的两相绕组会生成磁场，驱动控制器由六个功率晶体管组成，同时位置传感器作为通道，使包含着转子位置信息的电信号传入永磁无刷直流电机控制器里，控制部分根据电信号的信息控制电机驱动器的通断，为保证电路不出故障，在电机运转时，同一时间只有两路晶闸管工作。

3.2.2 永磁无刷直流电机的驱动原理

永磁无刷直流电机的运行机制主要依赖于电子控制器对转子位置的实时监测与反馈。通过动态调整电流的方向，控制器能够驱动转子实现连续旋转。与传统直流电机相比，永磁无刷直流电机取消了电刷和机械换向器，转而采用电子元件来控制电流的流向。这种设计不仅大幅提升了电机的效率，还使其具备更高的可靠性和更低的运行噪音。具体来说，永磁无刷直流电机通过逆变器中的功率管按照预设规律进行导通和关断，从而使定子电枢产生一个始终以 60 度的电角度大小逐步推进的磁场。这个磁场会带动转子旋转，其原理基于通电导体产生磁场的基本规律，即磁场的方向由电流的方向决定。当电流流经定子线圈时，会生成一个磁场，而磁场的方向则与电流的流向相关。通过有序地切换三相绕组的通电顺序，可以使转子磁铁沿顺时针方向持续转动。

永磁无刷直流电机的驱动控制系统由永磁无刷直流电机驱动器、永磁无刷直流电机驱动控制器、霍尔传感器等构成。永磁无刷直流电机驱动器作为能量来源为永磁无刷直流电机供能，永磁无刷直流电机驱动控制器通过调节 PWM 信号占空比的值改变电路电信号的输入，霍尔传感器的作用是记录永磁无刷直流电机转子的位置信号。

永磁无刷直流电机的运行方式为绕组的两两导通，三相线圈 A、B、C 的导通组合有六种情况，电机工作时始终保持三相绕组线圈的其中两相通入两个方向相反的电流，通过合理的顺序依次切换三相绕组的通电顺序，就可使转子跟着磁场旋转起来。这种精确的控制不仅提高了电机的效率，还允许电机在高转速下保

持良好的控制精度和稳定性。虽然永磁无刷直流电机的初始成本较高，但随着技术的发展，成本正在逐渐下降。此外，永磁无刷直流电机通过读取转子的实时位置，使用控制器来切换电流方向，这种无刷的设计减少了发热问题，工作温度较低，能更高效散热。综上，永磁无刷直流电机因其高效、可靠和噪音低等优点，在许多需要高性能的领域，如航空航天领域中得到了广泛应用。下图 3-2 为线圈绕组磁场示意简图，展现了绕组与磁场之间的关系。

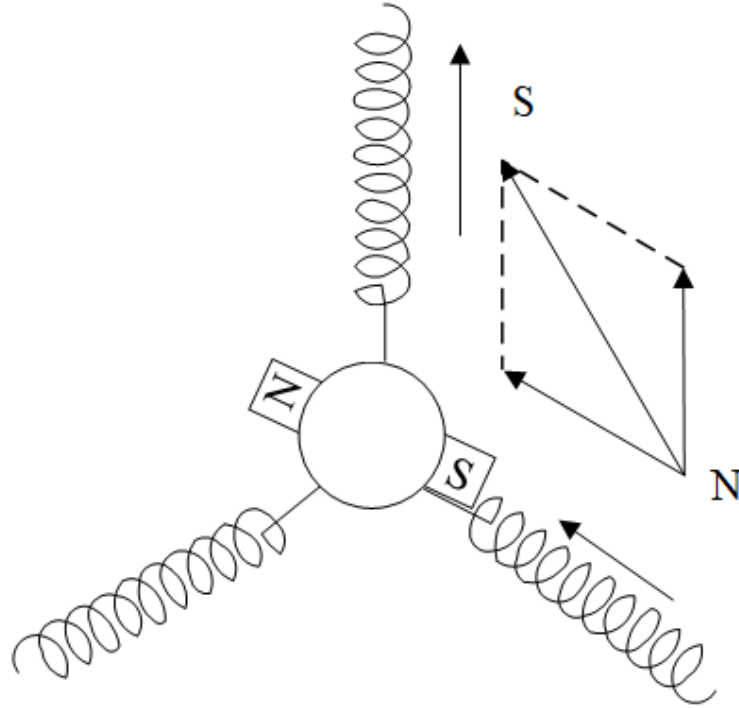


图 3-2 线圈绕组磁场示意图

3.3 永磁无刷直流电机仿真试验

3.3.1 永磁无刷直流电机数学模型

三相绕组有三角形接法和 Y 型接法这两种常见的连接方式，本课题使用 Y 形接法的三相六状态永磁无刷直流电机，该接法的永磁无刷直流电机具有性能好，运行稳定等优点。永磁无刷直流电机的数学模型是由磁链方程、电压平衡方程和电机运动学方程组成，其中的磁链方程是代数方程，电压平衡方程和运动学方程是微分方程^[63-64]。

每个绕组的磁链是它本身的自感磁链和其他绕组对它的互感绕组之和，可知磁链方程为：

$$\psi = L_s i_s + L_r i_r \quad (3-1)$$

式中, ψ 是绕组磁链, L_s 是绕组电感, i_s 是绕组电流, L_r 是其他绕组电感, i_r 是其他绕组电流。由式 3-1 知三相绕组的磁链方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{rA} \\ \psi_{rB} \\ \psi_{rC} \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

式中, ψ_A 、 ψ_B 、 ψ_C 是各绕组的磁链, L_{aa} 、 L_{bb} 、 L_{cc} 是各绕组的自感, 其余各项则是对应绕组间的互感, ψ_{rA} 、 ψ_{rB} 、 ψ_{rC} 分别为三相在其各相的分量, 关系如下:

$$\begin{bmatrix} \psi_{rA} \\ \psi_{rB} \\ \psi_{rC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{rm} \cdot \cos\theta \\ \psi_{rm} \cdot \cos(\theta - 120^\circ) \\ \psi_{rm} \cdot \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

式中, ψ_{rm} 为相应的幅值, θ 为转子转动的角度。在理想状态下忽略定子漏感可得:

$$\begin{cases} L_{aa} = L_p - L_o \cos 2\theta \\ L_{bb} = L_p - L_o \cos 2(\theta + 120^\circ) \\ L_{cc} = L_p - L_o \cos 2(\theta - 120^\circ) \\ M_{ab} = M_{ba} = -\frac{1}{2}L_p - L_o \cos 2(\theta + 120^\circ) \\ M_{bc} = M_{cb} = -\frac{1}{2}L_p - L_o \cos 2\theta \\ M_{ac} = M_{ca} = -\frac{1}{2}L_p - L_o \cos 2(\theta - 120^\circ) \end{cases} \quad (3-4)$$

式中, L_p 和 L_o 分别代表定子自感平均值和定子自感的二次谐波。选取理想状态, 则取定子互感等于自感平均值 $\frac{1}{2}L_p$ 定子互感的二次谐波为 L_o , 整理可得:

$$L = \begin{bmatrix} L_p - L_o \cos 2\theta & -\frac{1}{2}L_p + L_o \cos(2\theta + 30^\circ) & -\frac{1}{2}L_p + L_o \sin(2\theta + 30^\circ) \\ -\frac{1}{2}L_p + L_o \cos(2\theta + 30^\circ) & L_p + L_o \sin(2\theta + 30^\circ) & -\frac{1}{2}L_p - L_o \cos 2\theta \\ -\frac{1}{2}L_p + L_o \sin(2\theta + 30^\circ) & -\frac{1}{2}L_p - L_o \cos 2\theta & L_p + L_o \cos(2\theta + 30^\circ) \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

再依据电压方程:

$$u = Ri + \frac{d\psi}{dt} \quad (3-6)$$

式中, u 是相电压, R 是相电阻, i 是相电流。将磁链方程式 3-1 代入电压方程式 3-6, 展开后的电压方程为:

$$u = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{dL}{d\theta} \omega i \quad (3-7)$$

式中, L 是相电感, ω 为转子的机械角速度。整理可得,

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} L_p - L_o \cos 2\theta & -\frac{1}{2}L_p + L_o \cos(2\theta + 30^\circ) & -\frac{1}{2}L_p + L_o \sin(2\theta + 30^\circ) \\ -\frac{1}{2}L_p + L_o \cos(2\theta + 30^\circ) & L_p + L_o \sin(2\theta + 30^\circ) & -\frac{1}{2}L_p - L_o \cos 2\theta \\ -\frac{1}{2}L_p + L_o \sin(2\theta + 30^\circ) & -\frac{1}{2}L_p - L_o \cos 2\theta & L_p + L_o \cos(2\theta + 30^\circ) \end{bmatrix} \\
 & * \rho \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \\
 & \begin{bmatrix} \sin 2\theta & -\sin(2\theta + 30^\circ) & \cos(2\theta + 30^\circ) \\ -\sin(2\theta + 30^\circ) & \cos(2\theta + 30^\circ) & \sin 2\theta \\ \cos(2\theta + 30^\circ) & \sin 2\theta & -\sin(2\theta + 30^\circ) \end{bmatrix} 2L_o \omega \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} - \\
 & \omega \psi_{rm} \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta - 120^\circ) \\ \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (3-8)
 \end{aligned}$$

为了研究的简便，这里将电机磁极化为隐极式电机，假定电机的转子磁阻不随转子位置变化而变化，因而式 3-8 可化简为：

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_p & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_p & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2}L_p \end{bmatrix} \rho \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} - \omega \psi_{rm} \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta - 120^\circ) \\ \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

选取电流*i*为一个输入变量，变形可得：

$$\begin{bmatrix} i_A^* \\ i_B^* \\ i_C^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\frac{3}{2}L_p} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\frac{3}{2}L_p} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\frac{3}{2}L_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{R_s}{\frac{3}{2}L_p} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_s}{\frac{3}{2}L_p} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_s}{\frac{3}{2}L_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \omega \psi_{rm} \begin{bmatrix} \frac{1}{\frac{3}{2}L_p} \sin \theta \\ \frac{1}{\frac{3}{2}L_p} \sin(\theta - 120^\circ) \\ \frac{1}{\frac{3}{2}L_p} \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

电机系统的运动学方程为：

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt} + T_l + D\omega \quad (3-11)$$

式中， T_d 是电磁转矩， J 是电磁的转动惯量， T_l 是负载转矩， D 是直径， ω 是转子机械角速度。由电磁转矩公式可知：

$$T_d = C_m i_D \quad (3-12)$$

式中, C_m 为转矩系数, 将式 3-12 代入可变形为:

$$C_m i_D = J \frac{d\omega}{dt} + T_l + D\omega \quad (3-13)$$

同时选取转动角速度 ω 作为第二个输入变量, 变形, 可得:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{C_m}{J} i_D - \frac{1}{J} T_l - \frac{D}{J} \omega \quad (3-14)$$

取一相电流方程联立运动学方程研究, 可得:

$$\begin{bmatrix} i_s^* \\ \omega^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{\frac{3}{2}L_p} & \frac{1}{\frac{3}{2}L_p} \psi_{rm} \sin\theta \\ \frac{C_m}{J} & -\frac{D}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\frac{3}{2}L_p} & 0 \\ 0 & -\frac{T_l}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_D \\ T_l \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

式中, ψ_{rm} 为相应的幅值, θ 为转子转动的角度, L_p 代表定子自感平均值, C_m 为转矩系数, J 为转动惯量, ω 是转子机械角速度, i_s 是定子电流, U_D 是对应的一项电压, T_l 是负载转矩, R_s 是电枢电阻, D 是直径, i_s^* 与 ω^* 分别对应 i_s 与 ω 的一阶导。

3.3.2 永磁无刷直流电机仿真模型

根据经典控制理论和传递函数在 Matlab 中搭建永磁无刷直流电机的 Simulink 仿真模型^[65-66]。

增加永磁无刷直流电机的负载, 引入粘性摩擦系数, 得到电压平衡方程中的电流公式如式 3-16 所示:

$$I = \frac{T+B_v+J\omega}{K_t} \quad (3-16)$$

式中, I 是电流, T 是永磁无刷直流电机的负载, B_v 是粘性摩擦系数, J 是转动惯量, ω 是转子机械角速度, K_t 是电机的转矩系数。

再根据电压平衡方程, 得到电压方程如式 3-17 所示:

$$U = R \left(\frac{T+B_v+J\omega}{K_t} \right) + L \frac{d\left(\frac{T+B_v+J\omega}{K_t}\right)}{dt} + 2K_e \omega \quad (3-17)$$

式中, U 是电机电压, R 是电机电阻, L 是电机电感, K_e 是电机的反向电动势系数。

将式 3-17 展开列出各项在进行拉式变化得到式 3-18:

$$U(s) = \frac{R}{K_t} T(s) + \frac{L}{K_t} T(s)s + \left(\frac{RB_v}{K_t} \omega(s) + 2K_e \omega(s) \right) + \left(\frac{RJ}{K_t} \omega(s) + \frac{LB_v}{K_t} \omega(s) \right) s + \frac{LJ}{K_t} \omega(s)s^2 \quad (3-18)$$

将式 3-18 整理得电压平衡方程得最终的传递函数为式 3-19 所示:

$$\omega(s) = \frac{K_t}{((RB_v + 2K_e K_t) + (RJ + LB_v)s + LJ s^2)} U(s) - \frac{(R + Ls)}{((RB_v + 2K_e K_t) + (RJ + LB_v)s + LJ s^2)} T(s) \quad (3-19)$$

式中， ω 是转子机械角速度， K_t 是电机的转矩系数， R 是电机电阻， B_v 是粘性摩擦系数， K_e 是电机的反向电动势系数， K_t 是电机的转矩系数， J 是转动惯量， L 是电机电感， T 是永磁无刷直流电机的负载。

根据经过电压平衡方程的拉氏变换得到的式 3-19，在 Matlab/Simulink 中构建上述公式，如图 3-3 所示。

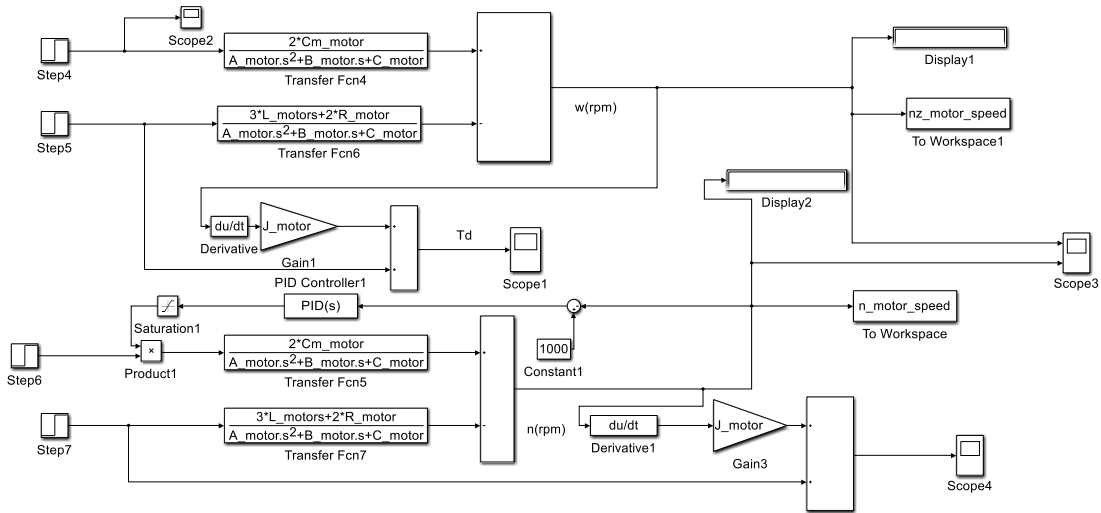


图 3-3 永磁无刷直流电机 Simulink 模型

其中，在图 3-3 所示的无刷直流电机中， J_motor 是转动惯量， R_motor 是电枢电阻， L_motor 是电感， O_motor 是气隙主磁通， B_v 是粘性摩擦系数， K_e 是反电动势系数， Cm_motor 是扭矩系数， D_motor 是直径， a_motor 是角度， $Constant1$ 是指 1000r/min 的预设目标电机转速。

图 3-3 中 A_motor ， B_motor ， C_motor 的展开式如式 3-20，式 3-21，式 3-22 所示：

$$A_motor = 3 * J_motor * L_motor \quad (3-20)$$

$$B_motor = 2 * R_motor * J_motor + 3 * L_motor * D_motor \quad (3-21)$$

$$C_motor = 2 * R_motor * D_motor - 2 * Cm_motor * O_motor * \sin(a_motor) \quad (3-22)$$

式 3-20，式 3-21，式 3-22 中 J_motor 是转动惯量， R_motor 是电枢电阻， L_motor 是电感， O_motor 是气隙主磁通， B_v 是粘性摩擦系数， K_e 是反电动势系数， Cm_motor 是扭矩系数， D_motor 是直径， a_motor 是角度。

图 3-3 的永磁无刷直流电机参数如表 3-1 所示：

表 3-1 永磁无刷直流电机参数

电机参数	价值
电机最大功率(KW)	7
电机极对数	16
额定扭矩(N · M)	55
峰值扭矩(N · M)	≥ 200
最大效率(%)	88
峰值基速(rpm)	140
额定功率(KW)	3
霍尔角度($^{\circ}$)	120
空载转速(rpm)	550 ± 50
轮毂固定螺丝中心距(mm)	80.8
霍尔工作电压(m)	550 ± 50
霍尔工作温度($^{\circ}\text{C}$)	$-40 \sim +150$
工作电压(V)	72(DC)

3.3.3 永磁无刷直流电机仿真结果与分析

根据图 3-3 的永磁无刷直流电机 Simulink 模型，在 Matlab 中定义电机的基础参数。所有仿真试验均在同一条件，同一环境下进行，Matlab 版本为 MATLAB-R2024a，计算机版本为 Windows11，预设目标转速均为 1000r/min。其电机转速随时间变化图像如图 3-4 与 3-5 所示，其中图 3-4 为开环控制（无 PID 控制）的电机转速随时间变化的图像，图 3-5 为 PID 控制且预设 PID 控制参数为： $K_p=20$ ； $K_i=2$ ； $K_d=0.1$ 的情况下，电机转速随时间变化的图像。

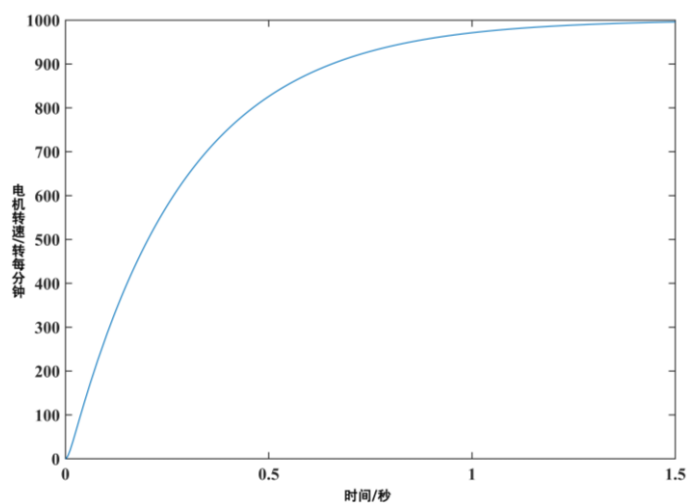


图 3-4 开环控制的电机转速波形图

从图 3-4 中,可以看出电机模型在无 PID 控制参数调节的情况下,其响应速度非常慢,无论是快速性、稳定性还是准确性都很差,这与下图 3-5 中预设 PID 控制参数的电机转速波形图形成了鲜明的差距。

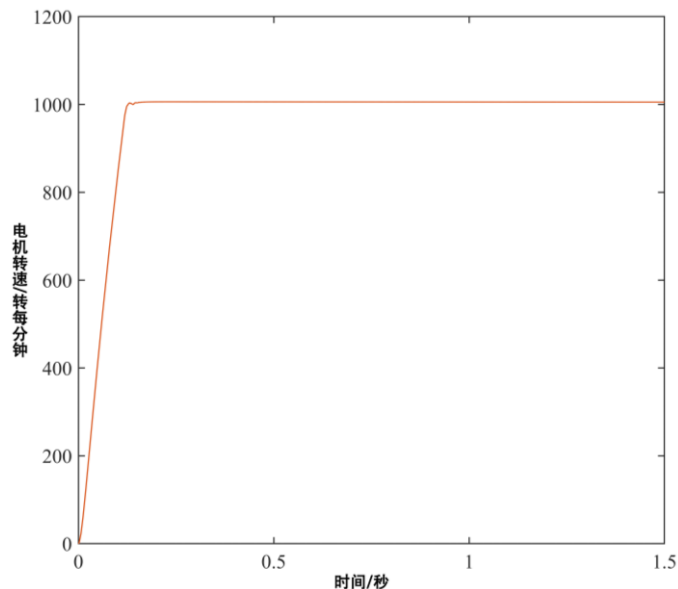


图 3-5 预设 PID 控制参数的电机转速波形图

图 3-5 中预设 PID 控制参数的电机转速波形图,其快速性、准确性以及稳定性有显著的提升。但是依旧存在预设的 PID 控制参数所生成的电机转速波形图稳定时的转速并不是目标转速 1000r/min,而是 1005.28724r/min,存在 0.53%的可消除误差。

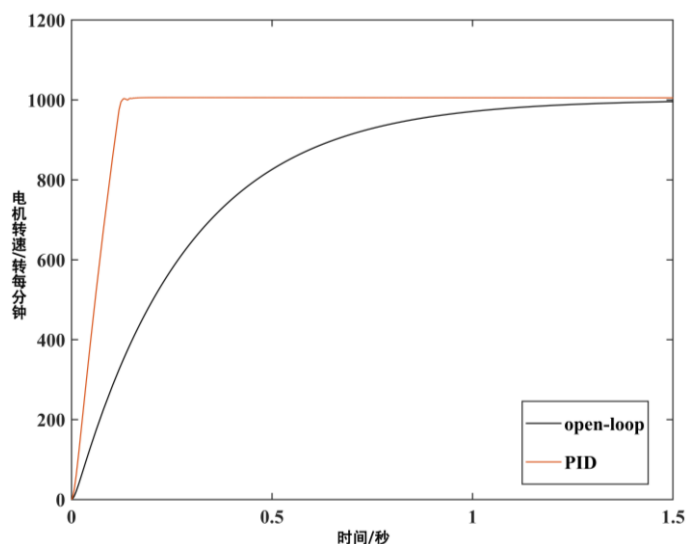


图 3-6 开环控制与预设 PID 控制参数的电机转速波形比较图

为方便观察与比较,制作图 3-6。图 3-6 为开环控制与预设 PID 控制参数的

电机转速波形比较图，从比较图可以更加直观观察出 PID 控制参数对于电机转速快速和稳定的正面提升。

图 3-7 所示为开环控制的条件下，电机仿真模型的转矩随时间变化图像。电机启动时会瞬间产生十分巨大的转矩，随后迅速下降并且趋于稳定。

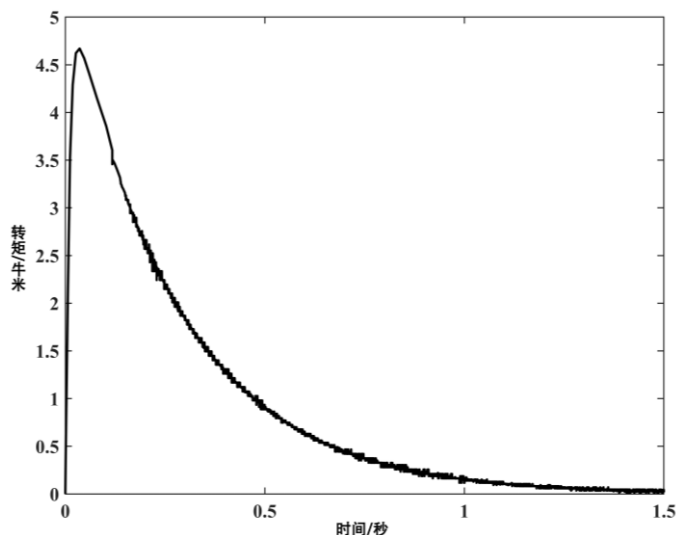


图 3-7 开环控制的电机转矩波形图

图 3-8 所示为预设 PID 控制参数的条件下，电机仿真模型的转矩随时间变化图像。相较于图 3-7，可以明显看出，图 3-8 中转矩的变化幅度更大，稳定速度更为迅速，体现了 PID 控制参数下的电机具有更好的鲁棒性。

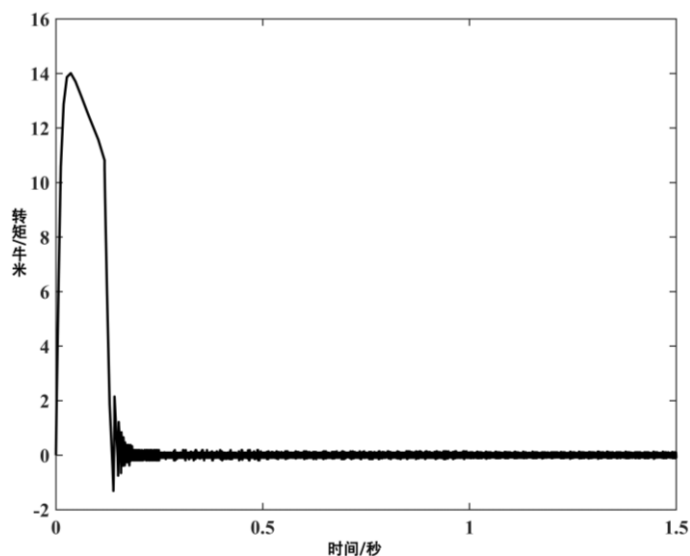


图 3-8 预设 PID 控制参数的电机转矩波形图

图 3-9 显示了实验所使用的永磁无刷直流电机的 map 图，其中横坐标是电机转速，单位是转每分钟；纵坐标是转矩大小，单位是牛米，它反映了永磁无刷

直流电机的电机速度与扭矩的关系。

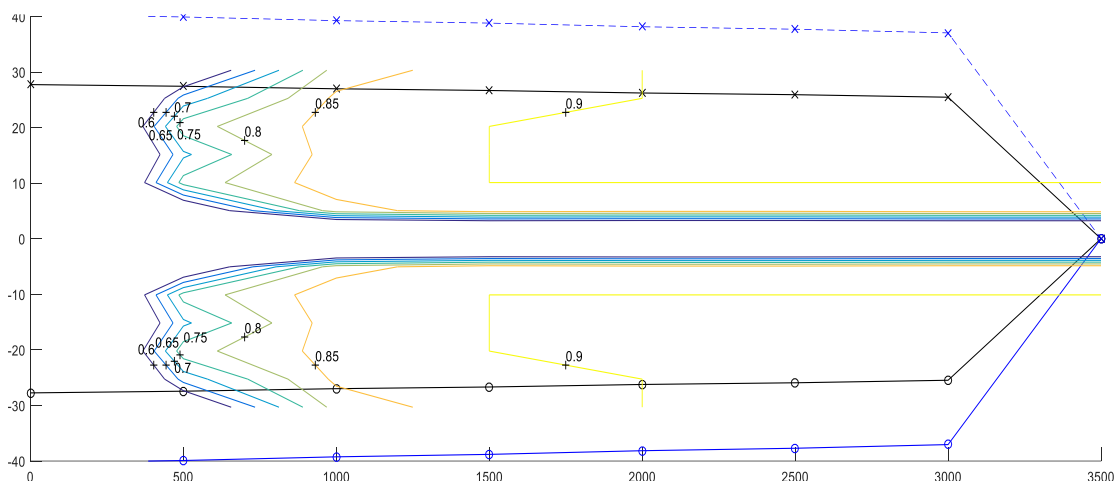


图 3-9 永磁无刷直流电机 MAP 图

经典控制理论的 PID 控制十分依赖参数的整定，不合适的 PID 控制参数会引起电机起始转速的巨大震荡，也会导致稳定时电机转速的波动较大，恢复稳定时的时间更长等致命缺陷，换言之，电机转速的稳定性、快速性以及准确性受 PID 控制参数的直接影响。所以下一章将主要研究永磁无刷直流电机其整定控制参数所使用的改进优化算法。

3.4 本章小结

本章对永磁无刷直流电机的工作原理和基本结构进行了详细分析，并基于其数学模型和结构特点，成功构建了永磁无刷直流电机的 Simulink 仿真模型。通过对仿真数据的计算、对比以及对转速波形图、转矩波形图和 Map 图的深入分析，得出以下重要结论：无 PID 控制的电机，响应速度非常慢，且无论是快速性，稳定性，还是准确性方面均表现不佳，难以满足高性能控制的要求。而预设了 PID 控制参数所控制的电机，在快速性、准确性和稳定性方面均有显著改善，同时转矩变化范围更大，稳定速度更快，充分展现了 PID 控制在提升电机鲁棒性方面的优势。以上结果验证了本课题所搭建的仿真模型的正确性和有效性，为后续研究奠定了坚实的理论和实验基础。

第 4 章 蜚螂优化算法优化 PID 参数的研究

4.1 引言

在前一章中,我们已经详细探讨了永磁无刷直流电机的基本结构、工作原理、仿真模型以及 PID 控制策略。PID 控制器的参数整定是控制过程中的核心环节,直接影响控制效果的优劣。传统方法在确定电机 PID 参数时存在一些局限性:经验积累法不仅耗时耗力,且效率较低;Ziegler-Nichols 法可能导致系统震荡或不稳定;而 Cohen-Coon 法则可能过于保守,导致控制器响应迟缓。相比之下,智能算法在优化驱动电机的 PID 参数方面表现出显著优势,能够实现电机快速响应、稳定运行,且几乎无超调现象。此外,针对不同的应用场景和控制需求,智能算法还能够灵活调整参数,以满足特定的控制性能要求。

因此,本章将采用一种改进的蜚螂优化算法来优化 PID 控制器的参数,以实现预期的控制效果。改进蜚螂优化算法与 PID 控制器参数结合的优势在于,它能够自动探索参数空间,找到最优的参数组合,从而提升控制效果。针对蜚螂优化算法可能陷入局部最优解和种群多样性不足的问题,我们引入了多策略融合的改进策略。通过迭代更新蜚螂的位置并重新评估适应度值,最终确定最佳的 PID 参数组合,以实现控制系统的稳定性、快速性和精确性。

4.2 元启发式算法

4.2.1 元启发式算法简介

元启发式算法(MetaHeuristic Algorithm)基于启发式算法的改进算法,它是随机算法与局部搜索算法相结合的产物。元启发式算法具有广泛的应用和实用性,常应用于各种行业领域,在新能源领域,元启发式算法的实际应用包括参数优化、车间调度、路径规划等^[67-69]。元启发式算法通过模拟动物行为或自然现象来解决问题,能够有效处理复杂的方程、非线性优化以及多解问题,尤其是在传统计算方法难以找到最优解的情况下^[70-71]。常见的元启发式算法有:灰狼优化算法(Grey Wolf Optimizer):模拟灰狼捕食的习性与狼群本身的个体地位,适用于参数优化和图像处理等问题。粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization):模拟鸟群或

者鱼群的种群行为，通过协作个体间寻找最好的值^[72]。遗传算法（Genetic Algorithm）：基于进化论和遗传学，通过个体的繁殖、变异和竞争来优化解，其中遗传算法还可以与蝴蝶优化算法（Butterfly Optimization Algorithm）进行结合，在蝴蝶优化算法中引入个体变异与交叉结合，能够得到很好的效果^[73]。模拟退火算法（Simulated Annealing）：模拟金属退火过程，是通过赋予搜索过程一种时变且最终趋于零的概率突跳性，寻找全局最优解的方式是由逐步降低温度，此种做法可有效避免陷入局部最优并最终寻找到全局最优的串行结构的优化算法^[74]。禁忌搜索算法（Tabu Search）：通过记录并设定此位置为禁忌区域，以此来避免重复所属，减少陷入局部最优的概率^[75]。在本章节除蜣螂优化算法外，所有其它算法的逻辑和书写均参考翟荣杰等人^[76]。算法改进以及仿真实验参考 Zhang 等人^[77-78]和 Xu 等人^[79-80]的相关文章。

4.2.2 灰狼优化算法

灰狼优化算法(GWO)是一种新颖的元启发式算法，其研究成果发表在权威 SCI 期刊《ADVANCES IN ENGINEERING SOFTWARE》上。灰狼优化算法的灵感来自于灰狼，该算法模拟了自然界中灰狼群体的等级制度和捕食行为，以实现优化搜索的目的。该算法基于灰狼种群的社会等级结构和狩猎行为，将搜索空间中的解看作是灰狼个体，通过模拟灰狼的等级制度和狩猎行为来寻找最优解。

GWO 模拟了自然界灰狼的领导层级和狩猎机制。灰狼种群有四种类型的灰狼：a，b，c，（a 是头狼，b 是次狼，c 是季狼）被用来模拟领导阶层，其余的灰狼 d 均是跟随高阶层的一般成员。同时，灰狼优化算法还模拟了捕猎过程的三个主要阶段：追踪目标、围困目标和发起攻击。

灰狼优化算法的基本逻辑步骤如下：

(1)初始化灰狼种群参数，即设置自变量上下限，种群数目、迭代次数、特征值等进行自定义。

(2)初步生成随机灰狼种群，根据自变量的上下限和种群数目等生成带有自定义目标特征值的灰狼初始种群，并且计算所有灰狼个体对应的适应度值。

(3)灰狼能够识别猎物的位置并包围它们。一旦猎物位置确定，d 在 a、b 以及 c 的带领下，引导狼群逐步包围猎物。

(4)当猎物停止移动时,灰狼通过攻击进行位置改变。具体来说,在迭代过程中,收敛因子从 2 线性递减至 0,攻击判定的值也会在相应区间内变化。当攻击判定的值位于区间内时,灰狼的下一位置可以是当前位置与猎物位置之间的任意位置。当是否攻击判定的值 <1 时,狼群向猎物发起攻击(陷入局部最优)。当是否攻击判定的值 >1 时,灰狼与猎物分离,希望找到更合适的猎物(全局最优)。

(5)反复进行上述 2-4 步骤,每一代前三个最优解 a , b , c 三匹狼按照一定的比例权重作为母代生成下一代蝴蝶种群,达到最大迭代数停止,输出图像,最小值,最小值所在的位置,对应迭代次数等结果。

灰狼优化算法随机生成的初始种群的表达式为:

$$X_h = \begin{bmatrix} x_1^1 & \cdots & x_1^H \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_N^1 & \cdots & x_N^H \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

其中, $H=1, 2, 3, \dots, n$ 。 X_h 是灰狼随机生成的初始种群, H 表示待优化问题的维数, N 表示灰狼种群的数量。

灰狼种群在进行捕食行为开始时,将进行范围搜索,根据灰狼个体与猎物个体的位置距离决定灰狼后续行动:

$$DIS = zxy * X_L(t) - X_g(t) \quad (4-2)$$

式中, DIS 是灰狼个体与猎物个体的位置距离, zxy 是系数向量, X_L 是猎物个体所处的位置, X_g 是灰狼个体所处的位置, t 表示当前迭代次数。在确定好灰狼个体与猎物个体的位置距离之后,根据距离决定灰狼个体是否对猎物个体进行捕食,灰狼种群包围猎物的方式如下:

$$X_g(t+1) = X_L(t) - yxz * DIS \quad (4-3)$$

式中, $X_g(t+1)$ 是灰狼个体进行位置更新后的所处的位置信息, X_L 是猎物个体所处的位置, yxz 与 zxy 均是系数向量, DIS 是灰狼个体与猎物个体的位置距离。

灰狼种群的寻找猎物的行为和包围猎物的方式所涉及的系数向量 zxy 与 yxz 具体计算公式如下:

$$zxy = 2 * Z_1 \quad (4-4)$$

$$yxz = 2 * a * Z_2 - a \quad (4-5)$$

$$a = 2 - 2 * \frac{t}{T} \quad (4-6)$$

式中， zxy 与 yxz 是系数向量， a 是收敛因子，其会随着灰狼种群不断迭代呈线性均匀递减，初始值为2，当灰狼种群迭代到最大，其最终值为0， Z_1 和 Z_2 均是服从[0,1]之间的均匀分布， t 是灰狼种群当前迭代次数， T 是灰狼种群最大迭代次数。

继灰狼种群进行猎物搜索、包围猎物之后，紧接着灰狼种群开始狩猎，整个灰狼种群的个体进行位置更新：

$$DIS_{\alpha} = zxy_1 * X_{\alpha} - X_g \quad (4-7)$$

$$DIS_{\beta} = zxy_2 * X_{\beta} - X_g \quad (4-8)$$

$$DIS_{\gamma} = zxy_3 * X_{\gamma} - X_g \quad (4-9)$$

式中， α 是头狼， β 是次狼， γ 是季狼， DIS_{α} 表示当前灰狼个体距离头狼 α 的距离， DIS_{β} 表示当前灰狼个体距离次狼 β 的距离， DIS_{γ} 表示当前灰狼个体距离季狼 γ 的距离， zxy_1 、 zxy_2 、 zxy_3 是系数向量， X_{α} 是头狼当前的位置， X_{β} 是次狼当前的位置， X_{γ} 是季狼当前的位置， X_g 是当前灰狼个体所处的当前位置。灰狼种群个体将进行位置更新：

$$X_{g1} = X_{\alpha} - yxz_1 * DIS_{\alpha} \quad (4-10)$$

$$X_{g2} = X_{\beta} - yxz_2 * DIS_{\beta} \quad (4-11)$$

$$X_{g3} = X_{\gamma} - yxz_3 * DIS_{\gamma} \quad (4-12)$$

$$X_g(t+1) = \frac{X_{g1} + X_{g2} + X_{g3}}{3} \quad (4-13)$$

式中， X_{g1} 是头狼进行位置更新之后的位置信息， X_{g2} 是次狼进行位置更新之后的位置信息， X_{g3} 是季狼进行位置更新之后的位置信息， X_{α} 是头狼进行位置更新之前的位置信息， X_{β} 是次狼进行位置更新之前的位置信息， X_{γ} 是季狼进行位置更新之前的位置信息， yxz_1 、 yxz_2 、 yxz_3 均是系数向量， DIS_{α} 表示当前灰狼个体距离头狼 α 的距离， DIS_{β} 表示当前灰狼个体距离次狼 β 的距离， DIS_{γ} 表示当前灰狼个体距离季狼 γ 的距离， $X_g(t+1)$ 表示种群下一代母代的位置信息。

通过分析该算法的原理可知,灰狼种群主要通过灰狼个体当前所处的位置与猎物个体当前所处的位置的距离差进行判定来决定位置更新的方式。通过对头狼、次狼、季狼的权重综合生成下一代种群的形式,这种产生下一代的方式有效的避免了灰狼种群搜索时陷入局部最优,体现了灰狼优化算法的优越性。图 4-1 为灰狼优化算法的逻辑流程图。

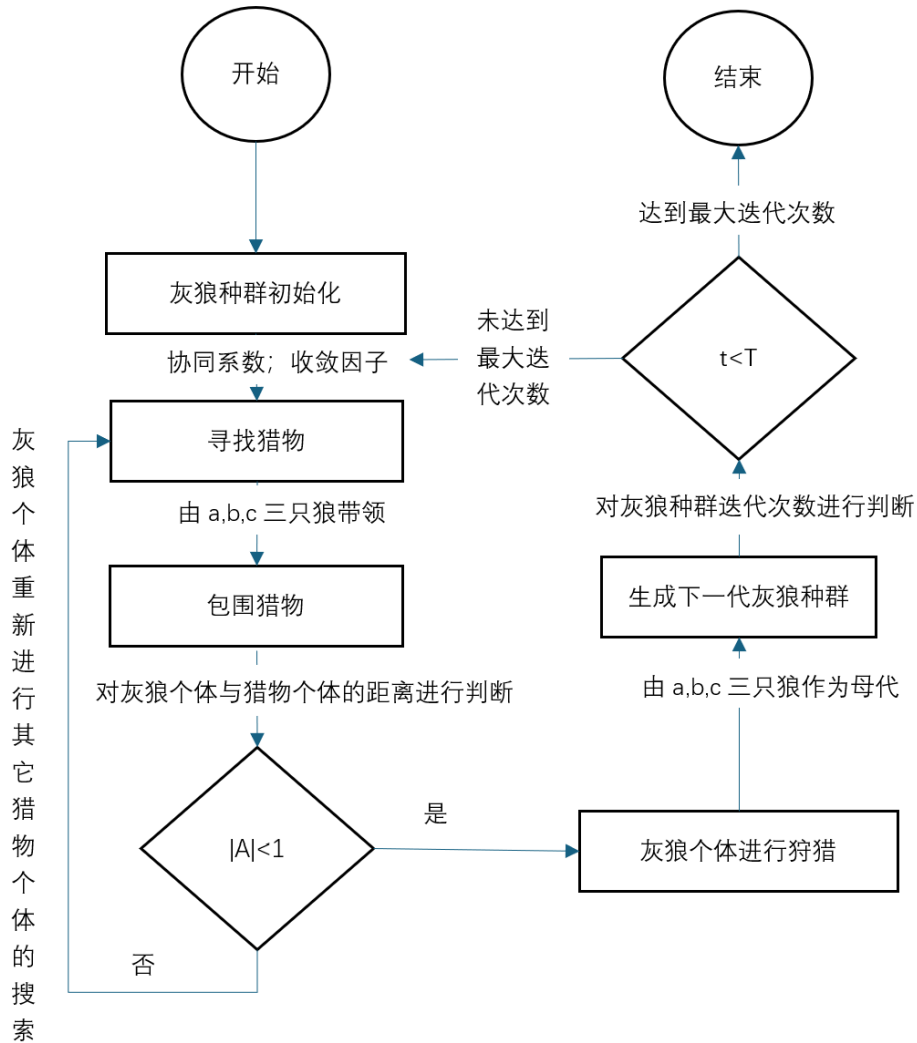


图 4-1 灰狼优化算法逻辑流程图

4.2.3 蝴蝶优化算法

蝴蝶优化算法(BOA)其灵感来自于蝴蝶种群个体在自然界的觅食行为以及信息交流行为,可以解决复杂的优化问题。BOA 模拟了自然界中蝴蝶个体通过释放信息素吸引其它同种群蝴蝶,借此更好的寻找食物的习性。蝴蝶优化算法的核心代码是模拟自然界中蝴蝶非常重要的两种不同的行为特征,分别是感知方法和移动方法。

自然界中蝴蝶种群个体通过其嗅觉、视觉、味觉、听觉、触觉来搜寻食物位置和寻找适合的伴侣，蝴蝶的五感不但可以使它们从不同的地方进行迁徙，提前逃离捕食蝴蝶为生的天敌的捕猎，而且还可以决定安全适合的地方进行下一代的孕育。在蝴蝶的无感中，蝴蝶的嗅觉最重要，嗅觉可以帮助蝴蝶寻找食物来源，嗅觉感受器分布在蝴蝶的触角、腿、触须等位置。嗅觉感受器是蝴蝶的暴露在体外的神经细胞，在觅食的同时，也可以承担寻找最佳的伴侣的功能，如雌性蝴蝶个体发出气味分泌物，雄性蝴蝶个体通过雌性蝴蝶个体散发的气味信息素识别雌性蝴蝶是否适配于自己。自然界中蝴蝶通过香味感知的行为，如果在整个区域中，那么便可以模拟蝴蝶种群个体的全局搜索，而当香味不足以吸引其它蝴蝶时，蝴蝶个体便会随机移动，那么这便可以模拟蝴蝶种群个体的局部搜索。

蝴蝶优化算法的基本逻辑步骤如下：

(1)初始化蝴蝶种群参数，即设置自变量上下限，种群数目、迭代次数、特征值等进行自定义。

(2)初步生成随机蝴蝶种群，根据自变量的上下限和种群数目等生成带有自定义目标特征值的蝴蝶初始种群，并且计算所有蝴蝶个体对应的适应度值。

(3)蝴蝶个体能够识别同种群其它蝴蝶同伴个体的信息素，信息素的值决定着蝴蝶感知到食物来源的优劣。通过模拟所有蝴蝶个体产生的香味浓度，蝴蝶种群个体进行高效准确的对食物来源的定位。

(4)当蝴蝶个体识别出最好的食物来源的位置后，蝴蝶种群个体均通过一定的移动策略前往其位置所在地。即通过局部搜索还是全局搜索其中之一的公式进行移动，更新蝴蝶个体位置和本代全局最优的位置，并且检查是否越界，如存在越界则进行越界处理。

(5)反复进行上述 2-4 步骤，根据适应度最好的蝴蝶个体为母代生成下一代蝴蝶种群，直到达到最大迭代数停止，输出图像，最小值，最小值所在的位置，对应迭代次数等结果。

蝴蝶优化算法随机生成的初始种群的表达式为：

$$X_u = \begin{bmatrix} x_1^1 & \cdots & x_1^U \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_N^1 & \cdots & x_N^U \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

其中, $U=1, 2, 3, \dots, n$ 。 X_u 是蝴蝶随机生成的初始种群, U 表示待优化问题的维数, N 表示蝴蝶种群的数量。蝴蝶优化算法在种群位置更新的程序代码中加入新参考系数, 参考系数很大程度上影响着蝴蝶种群个体的迭代位置。该参考系数的公式如下:

$$F_u = I_u^\varphi * C_u \quad (4-15)$$

式中, F_u 表示新参考系数的数值, I_u 是适应度值, C_u 为感知形态, φ 为适应度值的指数。 φ 和 C_u 的取值范围通常为[0,1], 前者在算法中的值默认为 0.1, 后者在算法中的值默认为 0.01。

在全局搜索阶段蝴蝶种群个体向新参考系数最高的个体进行更新, 实现该行为的方程如下:

$$X_{bi}^{t+1} = X_{bi}^t + (r_1^2 * B - X_{bi}^t) * F_{bi} \quad (4-16)$$

式中, X_{bi}^t 表示第*i*只蝴蝶在第*t*次迭代时的解向量, r_1 为[0,1]之间的均匀分布随机参数, B 为当前蝴蝶种群中的全局最优解, F_{bi} 表示第*i*只蝴蝶的信息素。

在非全局搜索阶段, 此搜索方式的前提是蝴蝶种群个体仅在局部区域内。实现该行为的方程如下:

$$X_{bi}^{t+1} = X_{bi}^t + (r_2^2 * X_{bj}^t - X_{bk}^t) * F_{bi} \quad (4-17)$$

式中, X_{bi}^t 是第*i*只蝴蝶在第*t*代的解向量, X_{bj}^t 是第*j*只蝴蝶在第*t*代的解向量, X_{bk}^t 是第*k*只蝴蝶在第*t*代的解向量, 其中 X_{bj}^t 和 X_{bk}^t 是在第*t*代种群中随机选择的两只蝴蝶种群个体的位置向量, r_2 为[0,1]之间的均匀分布随机参数。

通过分析蝴蝶优化算法的搜索方式可知, 其核心代码是模拟自然界中蝴蝶非常重要的两种不同的行为特征, 通过模拟行为特征, 蝴蝶种群个体根据新参考系数产生高吸引力的解, 抑制位置更差的解的吸引力。该搜索方式表明作用于单峰函数的求解效果会更好, 又或者在单个非全局最优解的情况下其搜索能力强。图 4-2 为蝴蝶优化算法的逻辑流程图。

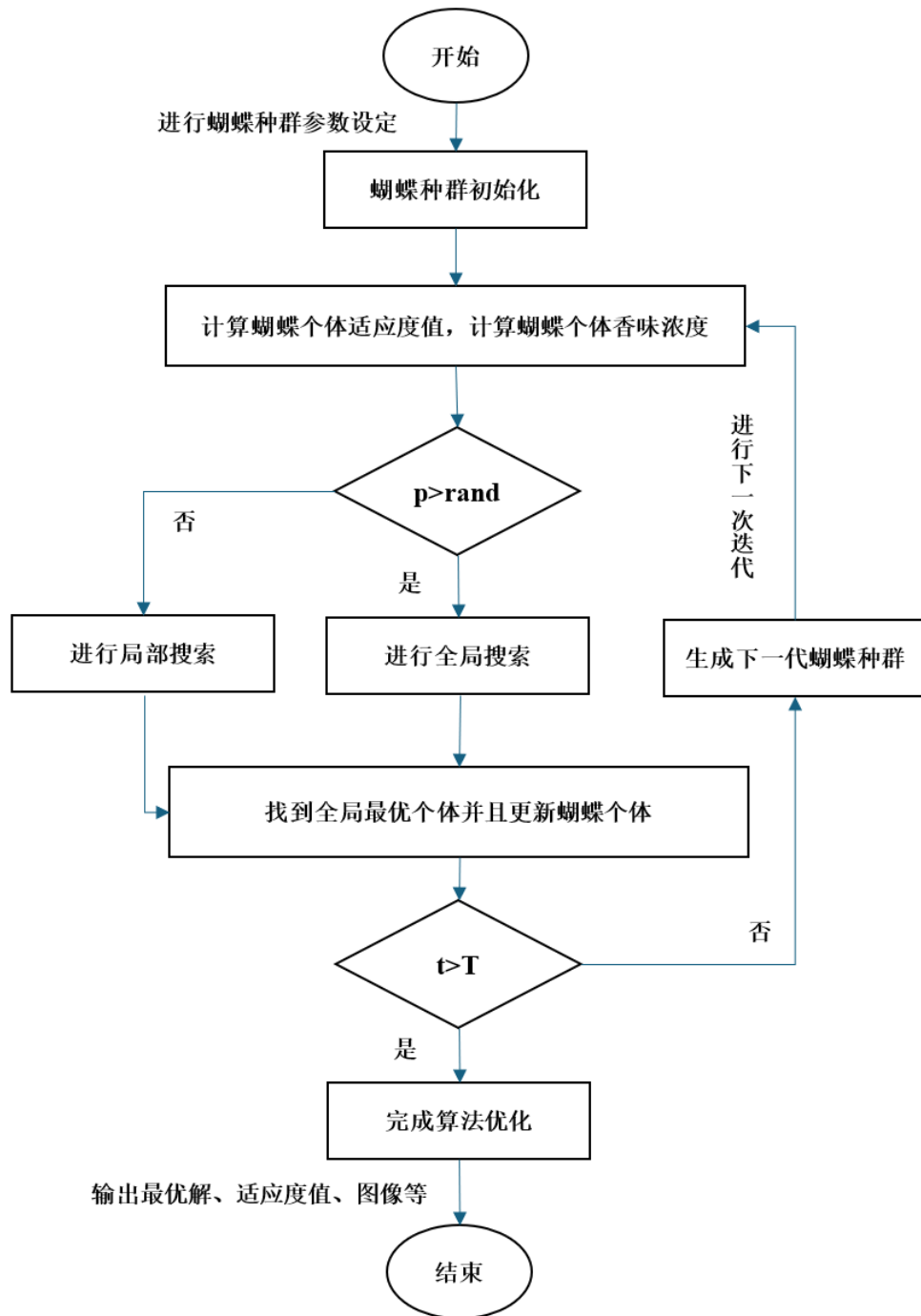


图 4-2 蝴蝶优化算法逻辑流程图

4.2.4 鲸鱼优化算法

鲸鱼优化算法(WOA)通过模拟座头鲸群体的自组织和自适应性来寻找最优解,模拟鲸鱼种群个体(座头鲸群体)的狩猎行为。其工作原理主要包括三个阶段:搜索猎物、环绕猎物和气泡网攻击法。

WOA 通过代码模拟座头鲸种群的两种搜索方式,其一是鲸鱼优化算法的局部搜索,主要捕食主力通过获取当前位置距离食物最优的个体所处的位置,附近

其余个体据此进行鲸鱼种群个体的位置更新。其二是鲸鱼优化算法的全局搜索，适用于当前鲸鱼种群活动区域中、可捕食范围内不存在猎物的情况。鲸鱼个体通过移动时鲸鱼种群个体的捕食范围的改变，即以当前鲸鱼种群个体为圆心，其捕食范围为半径的一个球体，如果该球体内存在可捕食的猎物，完成另一种位置更新。

鲸鱼优化算法的基本逻辑步骤如下：

(1)初始化鲸鱼种群参数，即设置自变量上下限，种群数目、迭代次数、特征值等进行自定义。

(2)初步生成随机鲸鱼种群，根据自变量的上下限和种群数目等生成带有自定义目标特征值的鲸鱼初始种群，并且计算所有鲸鱼个体对应的适应度值。

(3)鲸鱼种群个体进行搜索猎物阶段，鲸鱼种群个体在海洋中随机游动，为找到潜在的最优解尽可能多的探索搜索空间。此阶段中，每个解的位置更新是随机的，随机的位置更新是为了确保尽可能多的探索搜索空间区域。

(4)当鲸鱼个体识别出捕食范围内的食物来源的位置后，也就是当鲸鱼优化算法检测到一个有希望的解时，其他存在解便开始依据当前搜索到的有希望的最佳解，执行更加深入、方向更为明确的搜索。此阶段的目的是缩小搜索范围，将更多的鲸鱼种群个体投入到此范围内寻找最优解。

(5)当鲸鱼优化算法得到的解非常靠近最优解时，其模拟鲸鱼捕食的习性使用气泡网捕食的策略。此阶段十分精密，鲸鱼优化算法得到的解采取结合确定性和随机性的移动策略，同时细化并且完善解，通过增加确定性和减少随机性的有目的性的移动来搜索当前区域最优解。

(6)反复进行上述 2-5 步骤，根据适应度最好的鲸鱼个体为母代生成下一代鲸鱼种群，直到达到最大迭代数停止，输出图像，最小值，最小值所在的位置，对应迭代次数等结果。

鲸鱼优化算法随机生成的初始种群的表达式为：

$$X_w = \begin{bmatrix} x_1^1 & \cdots & x_1^J \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_N^1 & \cdots & x_N^J \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

其中， $J=1, 2, 3, \dots, n$ 。 X_w 是鲸鱼随机生成的初始种群， J 表示待优化问题

的维数， N 表示鲸鱼种群的数量。

鲸鱼优化算法的位置更新公式如下：

$$\begin{cases} A_w = 2a_w r_1 - a_w \\ a_w = 2 - \frac{2t}{T} \\ C_w = 2r_2 \end{cases} \quad (4-19)$$

式中，通过变量 p_w 以及系数 A_w 、 C_w 来确定。变量 p_w 随机产生位置更新， A_w 、 C_w 通过该式进行计算。 r_1 、 r_2 是随机生成的一个大小在 $[0,1]$ 之间的变量， a_w 为随迭代次数逐渐递减的变量，这里 a_w 和 GWO 中的收敛因子式子相同，从 2 到 0 线性递减，其作用也相同， T 为最大迭代次数， t 为当前迭代次数。

当 $p_w \geq 0.5$ 时，若 $|A_w| < 1$ 则采用第一种的位置更新方式。其公式如下：

$$D_1 = |C_w X_w^*(t) - X_w(t)| \quad (4-20)$$

$$X_w(t+1) = X_w^*(t) - A_w D_1 \quad (4-21)$$

式中， $X_w^*(t)$ 为当前目标猎物所处的位置， $X_w(t)$ 为当前鲸鱼种群个体所处的位置， D_1 为 $X_w(t)$ 到当前最优解 $X_w^*(t)$ 两者的位移。

若 $|A_w| \geq 1$ ，则采用第二种的位置更新方式。位置更新公式如下：

$$D_2 = |C_w X_w(t)_r - X_w(t)| \quad (4-22)$$

$$X_w(t+1) = X_w(t)_r - A_w D_2 \quad (4-23)$$

式中， $X_w(t)_r$ 为一只随机选定的鲸鱼种群个体当前所处位置的位置向量， $X_w(t)$ 为当前鲸鱼种群个体所处的位置的位置向量， D_2 为向量 $X_w(t)$ 与随机向量 $X_w(t)_r$ 两者的位移。

当 $p_w < 0.5$ 时，鲸鱼位置进行螺旋更新的数学表达式如下：

$$D_3 = |X_w^*(t) - X_w(t)| \quad (4-24)$$

$$X_w(t+1) = X_w^*(t) + D_3 e^{BL} \cos(2\pi L) \quad (4-25)$$

式中， $X_w^*(t)$ 为当前目标猎物所处的位置的位置向量， $X_w(t)$ 为当前鲸鱼种群个体所处的位置的位置向量， D_3 为当前位置向量 $X_w(t)$ 到当前最优解的位置向量 $X_w^*(t)$ 之间的距离。

通过分析鲸鱼优化算法的原理可知，鲸鱼种群个体在进行位置更新时，主要通过搜索猎物、环绕猎物、攻击猎物这三个阶段进行位置更新。鲸鱼优化算法的优点有算法求解无需大量的初始种群个数、参数设置少、操作简单、易于实现、

寻优能力强、收敛速度快、通用性好，但是也有对初始解的依赖较强、参数设置较为敏感、容易陷入局部最优解、求解稳定性较差等缺陷。图 4-3 所示为鲸鱼优化算法的逻辑流程图。

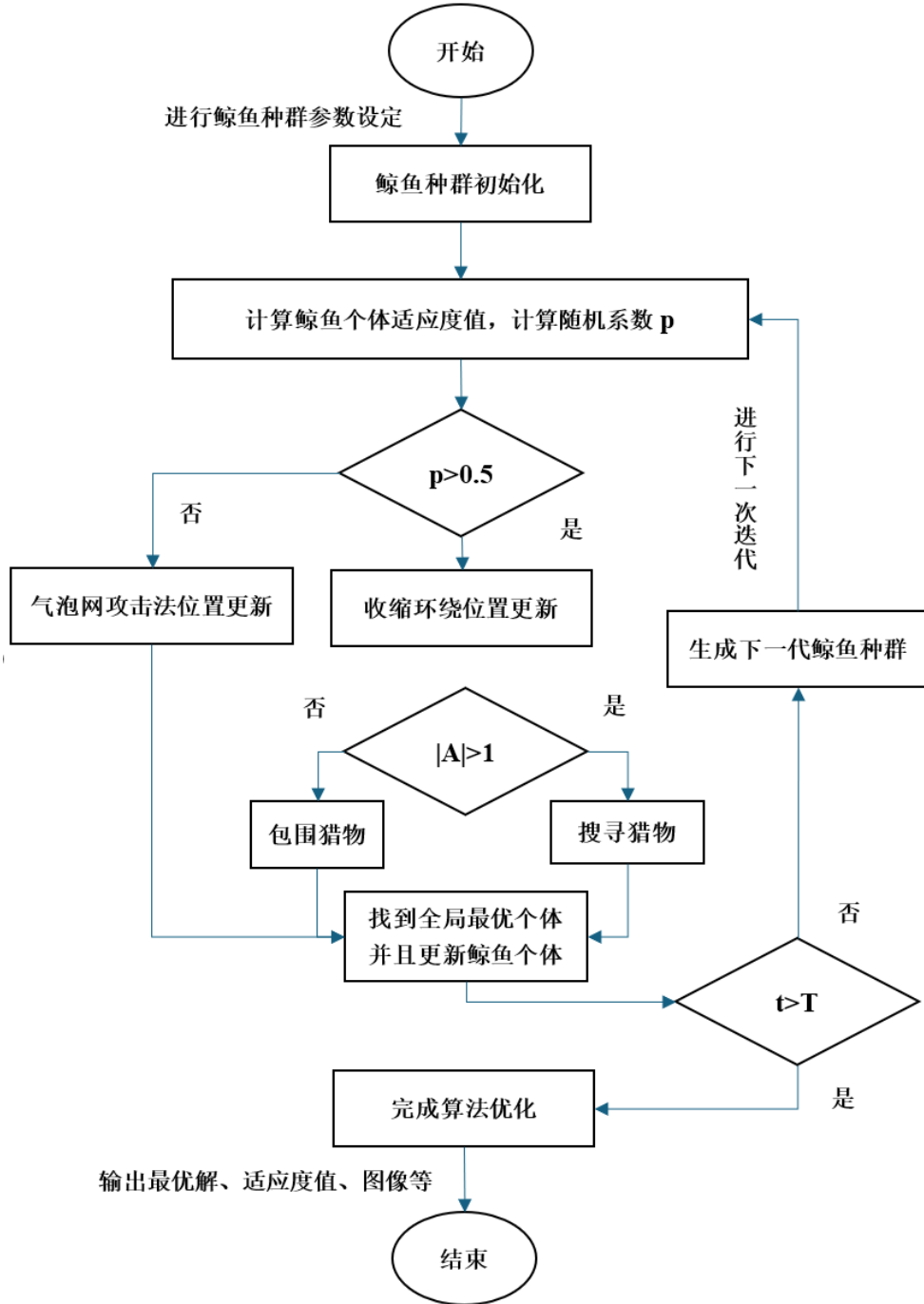


图 4-3 鲸鱼优化算法逻辑流程图

4.3 多策略融合改进蜚螂优化算法

4.3.1 蜚螂优化算法

蜚螂优化算法(DBO)由东华大学的沈波教授团队于 2022 年提出，其主要作

者为薛建凯，此人在研究生阶段就已经提出并且发表十分优秀的麻雀优化算法(Sparrow Search Algorithm)。该算法模拟了蜣螂的滚球跳舞、觅食、繁殖和偷窃生物等行为，通过蜣螂种群个体，根据其在种群之中的职能不同，再细分为小种群，并且依据不同的策略来解决问题。

蜣螂优化算法具有独特的种群结构，其重点在于种群不同职能通过不同的生存行为及相互之间的经验交互获得有利于自身的位置信息。每只蜣螂的位置代表问题的一个解，最终，最优蜣螂的位置即为所求问题的最优解。这种算法的主要思想是种群不同角色通过不同的生存行为及相互之间的经验交互获得有利于自身的位置信息，蜣螂的位置越好表示其适应环境的生存能力越优秀。蜣螂优化算法具有不错的寻优性能及实际应用潜力，可以应用到多种场景中，如无人机路径规划、神经网络参数优化等各类优化问题。此外，针对标准蜣螂优化算法存在的全局探索能力欠缺、收敛精度低及易陷入局部最优等不足，在初始蜣螂种群生成过程中将佳点集与反向学习策略相结合，使生成的初始蜣螂种群更加随机分散；将正余弦算法应用于惯性权重，引入新的参数，改进滚球蜣螂的位置更新公式。综合以上改进方法，本文提出了一种多策略融合改进蜣螂优化算法(zxyDBO)，并通过实验证明了其优越性。

蜣螂优化算法的基本逻辑步骤如下：

(1)初始化蜣螂种群参数，即设置自变量上下限，种群数目、迭代次数、特征值等进行自定义。

(2)初步生成随机蜣螂种群，根据自变量的上下限和种群数目等生成带有自定义目标特征值的蜣螂初始种群，并且计算所有蜣螂个体对应的适应度值。

(3)蜣螂种群个体进行模拟滚球行为。蜣螂种群个体在滚动过程中，根据导航的对象，如天体中的太阳、月亮、偏振光等运动轨迹的改变，自身的运动轨迹也会改变，大多数呈现弯曲或者椭圆形，还有可能因为一些自然因素，如不平整的地面、自然风等，导致蜣螂模拟滚球行为偏离原本的路径。而当蜣螂种群个体在滚球行为中遇到了无法逾越的障碍物，便会进行舞蹈行为，用切线函数得到一个新的滚动方向。

(4)蜣螂种群个体进行模拟繁殖行为。自然界中的粪球被蜣螂移动至安全的

位置后,其为了给予后代安全舒适的生长环境,便要对合适的产卵地点进行删选,产卵的范围与收敛因子相关,并且引入了蜣螂产卵区域边界选择策略。

(5)已经成虫的蜣螂被称之为小蜣螂,它们是蜣螂种群觅食的主力。小蜣螂会建立最优的蜣螂区域来引导同伴进行觅食,通过模拟最佳蜣螂区域边界以及正态分布还有随机向量来实现这一行为,其中最佳蜣螂区域边界与收敛因子相关。

(6)除去上述三种蜣螂小群体,蜣螂种群中还有一部分蜣螂被称之为偷窃蜣螂,它们专门偷窃其它蜣螂的粪球,特别是针对滚球蜣螂群体中最佳适应度值的那只滚球蜣螂所滚的粪球,这也是自然界十分常见的生物行为。通过对于最优食物来源和争夺食物的最佳地点来框定这一群体,模拟其生物行为。

(7)反复进行上述 2-6 步骤,根据适应度最好的蜣螂个体为母代生成下一代蜣螂种群,直到达到最大迭代数停止,输出图像,最小值,最小值所在的位置,对应迭代次数等结果。

蜣螂优化算法随机生成的初始种群的表达式为:

$$X_d = \begin{bmatrix} x_1^1 & \cdots & x_1^D \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_N^1 & \cdots & x_N^D \end{bmatrix} \quad (4-26)$$

其中, $D=1, 2, 3, \dots, n$ 。 X_d 是蜣螂随机生成的初始种群, D 表示待优化问题的维数, N 表示蜣螂种群的数量。

蜣螂种群个体在滚动过程中,根据导航的对象运动轨迹的改变,自身的运动轨迹也会改变。该运动过程可能会因为自然因素导致偏离,因此,当蜣螂种群个体在滚球行为中遇到了无法逾越的障碍物,便会进行舞蹈行为,用切线函数得到一个新的滚动方向。以上的行为用公式表达为:

$$x_i(t+1) = x_{i(t)} + \alpha \times k \times x_i(t-1) + b \times \Delta x \quad (4-27)$$

$$\Delta x = |x_i(t) - x^w| \quad (4-28)$$

其中 t 表示当前迭代次数,此处 $x_i(t+1)$ 为第 i 只蜣螂在第 t 次迭代时的位置, $k \in (0, 0.2)$ 表示偏转系数(在代码中被赋值 0.1), $b \in (0, 1)$ 为一个自然系数(在代码中被赋值 0.3); Δx 用来表示光强度的变化程度,其中 x^w 为当前种群内的最差位置。

粪球被滚回家后,选择合适的产卵地点,其定义如下:

$$Lb^* = \max(X^* \times (1 - R), Lb) \quad (4-29)$$

$$Ub^* = \max(X^* \times (1 + R), Ub) \quad (4-30)$$

其中 Lb^* , Ub^* 分别为产卵区域的下、上限, Lb , Ub 分别为搜索空间的下、上限, X^* 为当前种群内最优位置, R 为惯性权值。

粪球被蜣螂移动至安全的位置后, 其为了给予后代安全舒适的生长环境, 便要对合适的产卵地点进行删选, 产卵的范围与收敛因子相关, 并且引入了蜣螂产卵区域边界选择策略。该策略公式如下:

$$B_i(t+1) = X^* + b_1 \times (B_i(t) - Lb^*) + b_2 \times (B_i(t) - Ub^*) \quad (4-31)$$

其中 $B_i(t+1)$ 是第 t 次迭代时第 i 个孵卵粪球的位置, b_1 和 b_2 表示大小为 $1 \times D$ 的两个独立随机向量, D 表示优化问题的维数。

已经成虫的小蜣螂是蜣螂种群觅食的主力。小蜣螂会建立最优的蜣螂区域来引导同伴进行觅食, 通过模拟最佳蜣螂区域边界以及正态分布还有随机向量来实现这一行为。该边界公式如下:

$$Lb^b = \max(x^b \times (1 - R), Lb) \quad (4-32)$$

$$Ub^b = \min(x^b \times (1 + R), Ub) \quad (4-33)$$

其中 x^b 为全局最优位置, Lb^b 、 Ub^b 为最佳觅食区域的下、上限。确定好区域后, 就可以定义小蜣螂的位置更新方式:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + C_1 \times (x_i(t) - Lb^b) + C_2 \times (x_i(t) - Ub^b) \quad (4-34)$$

其中 $x_i(t)$ 表示第 t 次迭代时第 i 个小蜣螂的位置信息, C_1 表示遵循正态分布的随机数, C_2 表示属于(0,1)的随机向量。

蜣螂种群中还有一部分蜣螂被称之为偷窃蜣螂, 它们专门偷窃其它蜣螂的粪球, 特别是针对滚球蜣螂群体中最佳适应度值的那只滚球蜣螂所滚的粪球为。在争夺食物的迭代过程中, 偷窃蜣螂的位置更新方式如下:

$$x_i(t+1) = X^b + S \times g \times (|x_i(t) - X^* + x_i(t) - X^b|) \quad (4-35)$$

其中 $x_i(t)$ 表示第 t 次迭代中第 i 个小偷的位置, g 是大小为 $1 \times D$ 的随机向量, 服从正态分布, S 表示一个常量, 在代码中被赋值 0.5。

蜣螂优化算法来自于蜣螂的滚球跳舞、觅食、繁殖和偷窃生物行为的启发, 设计了五种不同的更新规则, 以帮助找到高质量的解决方案。每个蜣螂群由四种

不同的代理蜣螂组成，即滚球蜣螂、繁育蜣螂、小蜣螂和偷窃蜣螂。其本身具有新颖的优化机制，并且结合了局部搜索和全局搜索的策略，而且还有独特的种群结构等优点。图 4-4 所示为蜣螂优化算法的逻辑流程图。

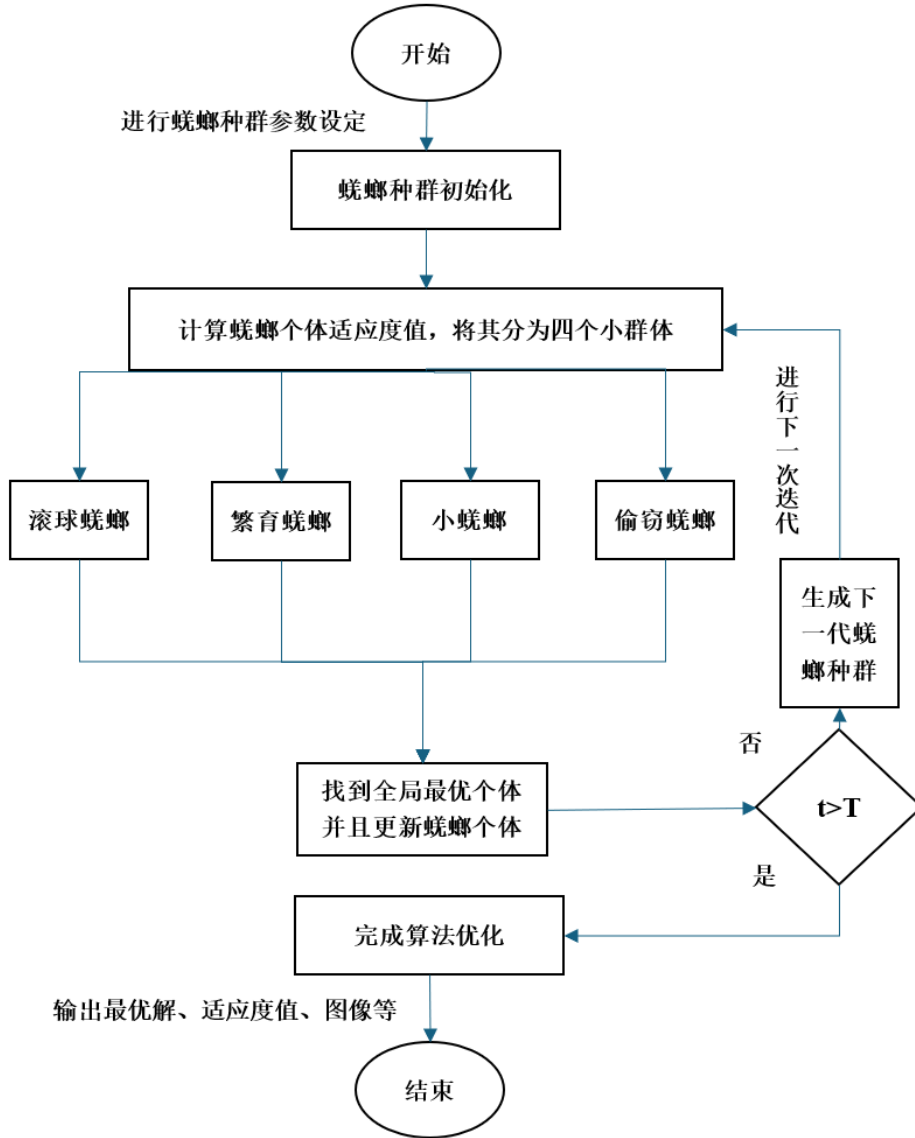


图 4-4 蜣螂优化算法逻辑流程图

4.3.2 反向学习策略

DBO 虽然使用随机生成初始种群，却依旧存在种群分布不均匀、种群质量较低、收敛速度过慢、种群多样性不丰富、易陷入局部最优等负面问题。本文 zxyDBO 在生成初始种群阶段，针对以上问题采用反向学习策略与佳点集相结合的方法来解决。

反向学习 OBL(Opposition-Based Learning)策略是由 Tizhoosh 提出的。该策略

提出了对点的概念,用对立搜索代替了随机搜索利用反向学习策略生成种群的主要思想是:反向学习策略会选择更靠近最优位置的个体作为种群的最初个体,生成的个体其种群分布会越来越靠近最优位置,这样便可以在一定程度上解决种群分布不均匀、种群多样性低、种群质量不高、影响算法的收敛速度等问题。此外,反向学习策略还可以通过搜索更多有效区域来提高群体的多样性,增强算法的全局搜索能力。

蜣螂优化算法随机生成的初始种群的表达式。根据反向学习策略,得到初始种群 X 所对应的反向种群的形式为:

$$X_* = \begin{bmatrix} x_1^1 & \cdots & x_1^D \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_N^1 & \cdots & x_N^D \end{bmatrix} \quad (4-36)$$

其中, $D=1, 2, 3, \dots, n$ 。 D 表示待优化问题的维数, N 表示蜣螂种群的数量,

而 X_* 代表整个蜣螂种群再根据反向学习策略的定义,得到:

$$X_* = rand \cdot (LB + UB) - X \quad (4-37)$$

其中, $rand$ 的含义是 D 行、 N 列、所有数都是 $[0,1]$ 的随机矩阵, UB 是自变量的上边界, LB 是自变量的下边界, X 代表初始蜣螂种群。根据式 4-36 得到新的初始蜣螂种群。

4.3.3 佳点集

佳点集是一种有效的、能够均匀选点的方法,其理论源自我国著名大数学家华罗庚,与随机方法相比,利用佳点集方法取点能够更均匀地分布在搜索空间中。初始种群均匀分布可确保种群的多样性和遍历性,提高算法的搜索性,在 DBO 中采用随机初始化种群个体,难以保证种群的多样性。佳点集是一种分布均匀、有效的选点方式,利用佳点集的均匀性初始化种群,可以提高种群的多样性。

目前,佳集点初始化种群的方式已经应用到很多智能优化算法中,并取得了有效的结果,如在遗传算法、粒子群优化算法等中都可以看到其应用。通过将佳点集方法应用到这些算法中,可以有效增加种群的多样性和遍历性,提升算法的性能和稳定性。经本人测试,在灰狼优化算法、麻雀优化算法中使用佳点集初始化种群,能够显著提高算法的全局搜索能力、避免陷入局部最优的概率、影响最优值所需的迭代次数等正面效果,这表明佳点集在算法中可以更好地解决优化问

题。

故采用佳点集进行种群初始化根据佳点集原理得到公式如下：

$$P_n(k) = \left\{ \left(\left\{ r_1^{(n)} * k \right\}, \left\{ r_2^{(n)} * k \right\}, \dots, \left\{ r_s^{(n)} * k \right\} \right), \right. \\ \left. 1 \leq k \leq n \right\} \quad (4-38)$$

其中 $P_n(k)$ 称之为佳点集， r 为佳点。 $\{r_s^{(n)} * k\}$ 代表取小数部分， n 则表示点数，再取：

$$r = \{2\cos(2\pi k/p), 1 \leq k \leq s\} \quad (4-39)$$

其中 p 是满足 $(p-3)/2 \geq s$ 的最小素数，将其映射到搜索空间为：

$$x_i(j) = (ub_j - lb_j) * \{r_j^{(i)} * k\} + lb_j \quad (4-40)$$

其中 ub_j 表示第 j 维的上界， lb_j 表示第 j 维的下界。

4.3.4 正余弦算法

正余弦算法(SCA)是一种新颖的随机优化算法，它利用正弦和余弦函数的波动性和周期性作为实现算法设计目标的基础，通过简洁明了的形式完备了智能优化算法所应具备的必要要素。这种算法具有参数少、结构简单、易实现、收敛速度快等优点，在实际应用中展现出较优的性能。SCA 算法通过正弦和余弦函数的周期波动性构造了实现全局搜索和局部开发两个线程功能的迭代方程，通过该简洁的更新迭代方程来施加扰动并更新解集，最终求得最优解或满足适应度要求的满意解。

在蜣螂优化算法的源代码中，惯性权重公式为：

$$R = 1 - t/M \quad (4-41)$$

其中 t 是当前种群迭代次数， M 是种群最大迭代次数。惯性权重 R 随当前种群迭代次数的增加而呈现稳定的线性递减。

引入正弦算法函数改进惯性权重高斯递减策略得到：

$$R^* = 1 - \sin((\pi/2) * ((t/M)^{zxy})) \quad (4-42)$$

其中 zxy 是 $k * \text{rand}(1) + K$ ， k 与 K 均是一个自定义常数，这里设定的都是1， $\text{rand}(1)$ 是 $[0,1]$ 的随机数。 R^* 是新的惯性权重，该惯性权重随当前迭代次数非线性非均匀递减。

r 是引入余弦算法且与当前迭代次数相关的新参数，其公式如下：

$$r = 0.5 * \cos(\pi * t/M) + 0.5 \quad (4-43)$$

再引入正余弦算法对蜣螂优化算法的滚球蜣螂进行改进，得到如下新的位置更新公式：

$$X(t+1) = \begin{cases} X(t) + 0.3 * X(t) - X(t)_{worst} + a * p * X(t-1) & h < HT \\ R^* * X(t) + r * \sin(u) * (U * Q(t) - X(t-1)), & h \geq HT \end{cases} \quad (4-44)$$

其中， $X(t+1)$ 指的是下一代滚球蜣螂， $X(t)$ 指的是当前迭代次数对应的滚球蜣螂， $X(t)_{worst}$ 指的是当前迭代次数对应的适应度值最差的滚球蜣螂个体， $X(t-1)$ 指的是上一代滚球蜣螂， a 的值取正一或者负一，由蜣螂优化算法中原本的代码判断， p 是一个常数，值是 0.1； R^* 是新的惯性权重， r 见式 4-43， u 是 $[0, 2\pi]$ 的随机数， U 是 $[-2, 2]$ 的随机数， $Q(t)$ 是当前迭代次数下最好的滚球蜣螂个体乘以一个正切值，正切值根据蜣螂优化算法中原本的代码决定。

4.4 验证改进蜣螂优化算法的优越性

为了验证 zxyDBO 的优越性，先要验证其改进方法是否有效，即需验证 zxyDBO 的有效性。在做智能优化算法的相关内容时，常常会用标准测试函数（CEC）去评判和验证算法的优化性能。通过标准测试函数，可以测试算法在寻找最优解过程中的表现，包括收敛速度和稳定性，并且不同的优化算法在处理同一组测试函数时，表现会有所不同，通过对比这些函数的测试结果，可以评估不同算法的优劣。这些标准测试函数一共 23 个，分为单峰测试函数，多峰测试函数，以及固定维多峰测试函数。

本课题使用表 4-1 中的六个基准测试函数进行测试。所有测试均在相同的操作条件下进行，使用 MATLAB 2024a 版本和 Microsoft Windows 11 操作系统进行模拟，所有其他条件均一致。在表 4-1 中，F1, F2, F3, F4 是单峰测试函数，F5 和 F6 是多峰测试函数。单峰函数用于测试算法的收敛速度，而多峰函数用于测试该算法的优化能力以及是否能够逃脱局部最优的能力。其中算法的收敛速度指的是该优化算法在固定的初始种群数目的情况下，其寻找最优值所需要的迭代次数得多少，这项指标是所需求的迭代次数越少越好；而算法能否逃脱局部最优的能力指的是该算法处理有多个波谷的函数时，总能寻找到最低波谷的特性。

表 4-1 标准测试函数

函数名称	种群数目	取值范围	理论最优值
F1(Sphere)	30	$[-100,100]$	0
F2(Schwefel's2.22)	30	$[-10,10]$	0
F3(Schwefel's Problem 1.2)	30	$[-100,100]$	0
F4(Schwefel's Problem 2.21)	30	$[-100,100]$	0
F5(Generalized Penalized.1)	30	$[-50,50]$	0
F6(Generalized Penalized.2)	30	$[-50,50]$	0

为验证 zxyDBO 相对于其他智能优化算法的优越性, 本文选择了 GWO、BOA、WOA 和 DBO 进行比较。所有算法的最大迭代次数为 500 代, 初始种群大小为 30, 所有算法均运行 50 次, 求其每代最优适应度值的均值作图。与其他智能优化算法相比, 初始种群规模仅设置为 30, 最大迭代次数设置为 500 代, 以比较和分析 zxyDBO 改进算法的稳定性、逃逸局部最优的能力和收敛速度等。

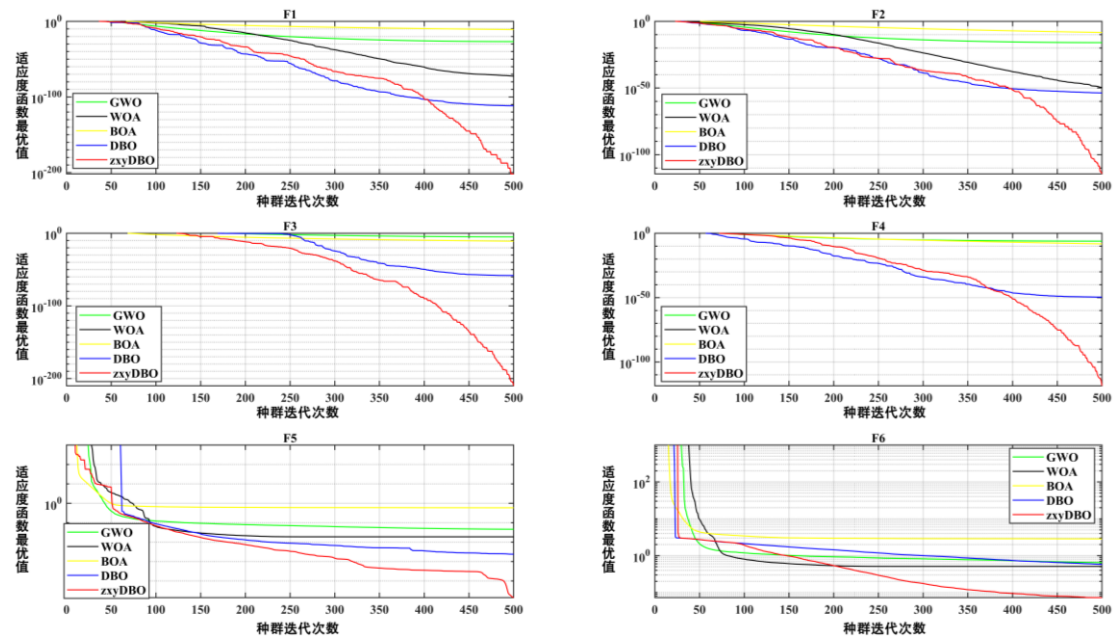


图 4-5 各种元启发式算法的标准测试函数比较图

图 4-5 中, 图像 F1 为不同算法对函数 Sphere 求解的结果变化曲线图; 图像 F2 为不同算法对函数 Schwefel's2.22 求解的结果变化曲线图; 图像 F3 为不同算法对函数 Schwefel's Problem 1.2 求解的结果变化曲线图; 图像 F4 为不同算法对图像 Schwefel's Problem 2.21 求解的结果变化曲线图; 图像 F5 为不同算法对函数 Generalized Penalized.1 求解的结果变化曲线图; 图像 F6 为不同算法对函数 Generalized Penalized.2 求解的结果变化曲线图。

从图 4-5 的分析可得, zxyDBO 在四个单峰函数 F1、F2、F3、F4 的前中期阶段表现出稳定的优化能力,而在迭代约 80%左右时,其逃逸局部最优的能力和收敛速度明显高于 DBO,远优于 GWO、WOA 和 BOA。而且,在 F5、F6 这两个多峰函数的优化上,通过图像中可以明显观察得: zxyDBO 在优化能力和逃逸局部最优的能力方面仍然领先于其他智能优化算法。这可以证明,本文提出的多策略融合改进蜣螂优化算法(即 zxyDBO)在收敛速度、优化能力和逃逸局部最优的能力方面比其他智能优化算法具有显著优势。

同时,记录下 Matlab 工作区数据,所有算法均运行 50 次,均同一实验条件 and 环境下得到的真实数据,得到下表 4-2 与 4-3 各算法优化对应各基准测试函数的适应度值均值与标准差比较情况。

表 4-2 各算法优化对应各基准测试函数的适应度值均值比较

测试函数	GWO	WOA	BOA	DBO	zxyDBO
	平均值	平均值	平均值	平均值	平均值
F1(Sphere)	1.67e-27	3.89e-73	1.29e-11	2.00e-112	1.93e-202
F2(Schwefel's2.22)	1.11e-16	2.79e-50	4.26e-09	1.91e-54	4.14e-115
F3(Schwefel's Problem 1.2)	1.14e-05	4.33e+04	1.26e-11	7.65e-59	9.85e-211
F4(Schwefel's Problem 2.21)	7.59e-07	48.0725	6.11e-09	2.35e-50	2.99e-119
F5(Generalized Penalized.1)	0.0464	0.0189	0.5912	0.0024	1.40e-05
F6(Generalized Penalized.2)	0.6474	0.5113	2.8470	0.5797	0.0725

从表 4-2 的数据可直观分析得, GWO、WOA、BOA 在基准测试函数的平均值方面表现均较差,在输出种群仅有 30 数目的前提下,无法达到迅速的收敛。DBO 在基准测试函数的平均值方面表现明显优于其它三种算法,这是由 DBO 本身的算法性质决定的。而 zxyDBO 无论在 F1-F4,这四个单峰测试函数适应度最优值的平均值的优化方面,还是在 F5、F6 这两个多峰测试函数适应度最优值的平均值的优化方面,均显著优于其它所有的算法。尤其在单峰测试函数的适应度

最优值的平均值方面，zxyDBO 的效果明显好于其它所有算法。这说明 zxyDBO 即使在种群数目较低的情况下，其搜索能力强，寻优能力好，收敛能力优秀。

表 4-3 各算法优化对应各基准测试函数的适应度值标准差比较

测试函数	GWO	WOA	BOA	DBO	zxyDBO
	标准差	标准差	标准差	标准差	标准差
F1(Sphere)	2.48e-27	2.08e-72	8.89e-13	9.85e-112	0
F2(Schwefel's 2.22)	8.73e-17	8.66e-50	1.44e-09	1.02e-53	2.93e-114
F3(Schwefel's Problem 1.2)	3.63e-05	1.33e+04	9.86e-13	5.41e-58	0
F4(Schwefel's Problem 2.21)	7.58e-07	24.0886	4.39e-10	1.23e-49	2.11e-118
F5(Generalized Penalized.1)	0.0273	0.0102	0.1700	0.0147	3.28e-05
F6(Generalized Penalized.2)	0.2045	0.2650	0.2232	0.4332	0.0944

从表 4-3 的数据可直观分析得，GWO、WOA、BOA 在基准测试函数的标准差方面表现与上文平均值一样表现很差，无法达到稳定的收敛，DBO 在基准测试函数的标准差方面表现明显优于其它三种算法。zxyDBO 不光在 F1-F4，这四个单峰测试函数适应度最佳值的标准差方面，还是在 F5、F6 这两个多峰测试函数适应度最佳值的标准差方面，稳定性均强于其它所有的算法。这说明 zxyDBO 的整体稳定性好，跳出局部最优等能力更高。结合表 4-2 与表 4-3 分析所得出的结论，可以证明 zxyDBO 其优化能力、收敛能力、算法稳定性、跳出局部最优等能力均远远高于其他算法与原算法，即 DBO 经过本文三种方法改进得到的 zxyDBO 的优越性和算法本身能力的提升相当成功。

综上所述经过多方面比较，zxyDBO 的求解能力具有明显的优势，适合用来对 PID 控制算法参数进行优化。

4.5 多种算法整定 PID 控制参数仿真实验

根据《控制工程基础》（第 4 版）一书中指出的瞬态性能指标，分为延迟时间、上升时间、峰值时间、最大超调量、调整时间这五个评价标准。本文选取上

升时间、调整时间、最大超调量这三个评价标准，按一定权重作用于蜣螂优化算法的适应度函数。本文将不同的智能优化算法与 PID 相结合，并将其三个 PID 控制参数——比例控制参数 K_p 、积分控制参数 K_i 和微分控制参数 K_d 进行了整合。设置的种群数目为 30，维度为 3（对应 K_p 、 K_i 、 K_d 三个参数），最大迭代次数为 5，自变量范围为[0,100]，时间上限为 1.5 秒，目标转速 1000rpm。选取的对比优化算法为 GWO、WOA、BOA、DBO 进行对比。所有的算法均在同一环境，同一条件下运行，分别寻优各自最好的 K_p 、 K_i 、 K_d 。限制种群数目 30 与最大迭代次数 5 是为了检验优化算法的寻优能力、收敛速度、跳出局部最优的能力。实验图像如图 4-6 所示，各算法求出的参数如表 4-4 所示，评价数据如表 4-5 所示。

表 4-4 不同改进策略求出的对应参数

参数	GWO	WOA	BOA	DBO	zxyDBO
K_p	33.2269	100	44.9078	43.3191	95.3214
K_i	8.0371	100	20.1483	53.1944	13.6603
K_d	4.3121	100	19.4436	0.7066	0.4901

表 4-4 结合图 4-6 可以看出，WOA 作为以多目标算法著名的优化算法，在三个参数上均陷入了局部最优；DBO 在 K_i 这个参数上的寻优能力弱，可能陷入了局部最优的困境；GWO 在 K_d 这个参数上效果差，说明其寻优能力不稳定；BOA 的 k_i 、 k_d 参数寻优的效果也都比较差，说明其在 PID 控制参数方面的搜索能力弱；而 zxyDBO 在三个参数上均表现出色，得到了最好的数据，可以证明经过本文三种方法改进得到的 zxyDBO 的优越性和算法本身能力的提升相当成功。

表 4-5 电机转速 1000rpm 下整定 PID 评价

算法	上升时间	调整时间	超调量	1.5s 时转速
Open-loop	0.655	1.099	0.5%	999.51
GWO	0.287	0.422	2.7%	1024.34
WOA	0.980	1.155	10.1%	1101.04
BOA	0.682	0.796	8.3%	1082.57
DBO	0.109	1.204	6.8%	1014.14
zxyDBO	0.108	0.120	0.1%	1001.39

从表 4-5 数据也可以验证 zxyDBO-PID 在种群数目和最大迭代数目都很少的情况下，无论是几乎没有超调量，还是曲线的稳定性方面都显著表明在整合 PID 控制参数方面，zxyDBO 达到了比其他智能优化算法更好的效果，曲线也具有显著的稳定性。各算法优化 PID 控制参数控制效果如下图 4-6 所示，结合上表 4-5 可以从数据和图像方面均证明 zxyDBO-PID 控制程序的可行性与优越性。

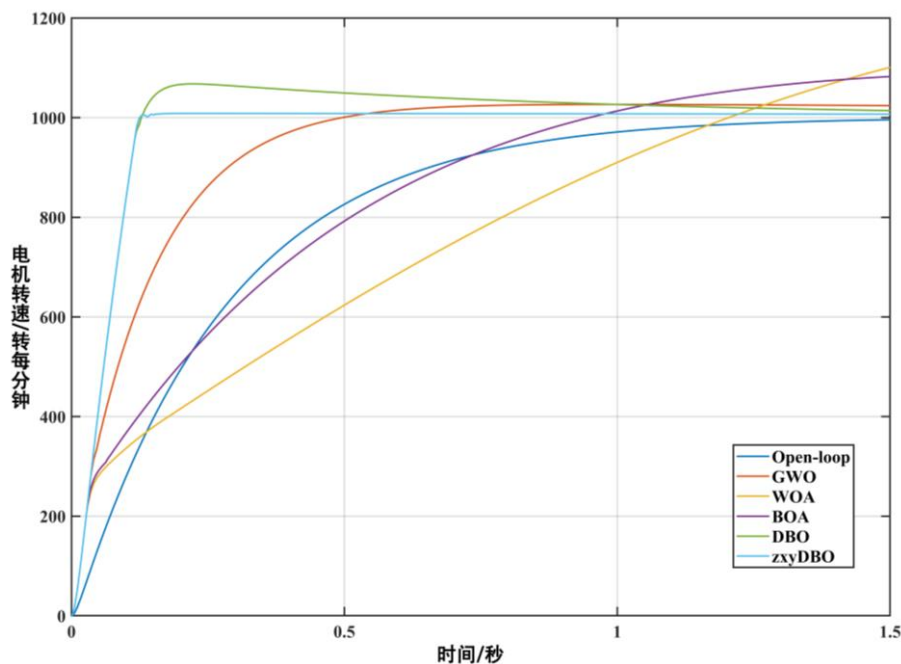


图 4-6 1000rpm 电机转速变化曲线

图 4-6 展现了目标转速 1000rpm 的电机转速变化曲线，其中 open-loop 指的是开环控制，即不增加任何 PID 调节情况下电机转速与时间的关系图像。从图像可以看出，zxyDBO 所优化的 PID 控制参数所控制的仿真电机的稳定时间短、达到目标转速快、超调量小，明显比其他智能优化算法所控制的电机转速变化曲线更优越。

本文提出了 zxyDBO，并对灰狼优化算法、鲸鱼优化算法、蝴蝶优化算法和蜣螂优化算法进行了比较。得出以下结论：

(1) zxyDBO 的优化能力显著提高，基准测试函数图像中显示的最优值在数据和图像方面明显优于其他三种优化算法，部分函数甚至将其最优值提高了 50 个数量级。

(2) zxyDBO 在迭代后半段具有最快的收敛效率。基准测试函数图显示，zxyDBO 在 400 代后开始快速收敛，而其他三种优化算法通常没有这种能力。

(3) zxyDBO 具有最强的局部逃逸能力,对于四个测试函数, zxyDBO 显然获得了更好的最优值。

(4) zxyDBO-PID 的各项指标无疑优于其他优化算法,其上升时间分别比灰狼优化算法,鲸鱼优化算法和蝴蝶优化算法优化了 265.7%, 907.4%和 631.5%,调整时间分别优化了 351.7%, 962.5%和 663.3%。与灰狼优化算法相比,超调量优化了 2.6%,与 WOA 相比优化了 10.0%,与 BOA 相比优化了 8.2%,与 DBO 相比优化了 6.7%;在稳定性方面,与其他算法相比,1.5 秒时的速度可以显著表明 zxyDBO-PID 具有更高的稳定性。

4.6 本章小结

本章主要研究元启发式优化算法及其改进,以及永磁无刷直流电机 PID 控制算法的参数优化。通过基准测试函数与仿真模型得到对应的数据和图像。

首先,本章对四种元启发式优化算法进行了原理分析、逻辑阐述和公式罗列,并绘制了各自的优化算法流程图,全面深入地介绍了每种算法的应用。随后对蜣螂优化算法进行改进,使用反向学习策略,佳点集,正弦算法,余弦算法,以及正余弦算法相结合的多种改进融合策略。对四种元启发式优化算法以及改进蜣螂优化算法,进行了同种实验条件下,同种实验环境下的五十次算法测试模拟,最终通过每代最优适应度值的 50 次平均数据图像分析,和最优适应度值的均值与标准差的表格比较,证明 zxyDBO 其优化能力、收敛能力、算法稳定性、跳出局部最优等能力均远远高于其他算法与原算法,其求解能力具有明显的优势,适合用于 PID 控制算法参数进行优化。

验证 zxyDBO 能力之后,根据《控制工程基础》(第 4 版)一书中指出的瞬态性能指标五个评价标准。选取上升时间、调整时间、最大超调量这三个评价标准,按一定权重作用于蜣螂优化算法的适应度函数。并且将不同的智能优化算法与 PID 相结合,并将其三个 PID 控制参数——比例控制参数 K_p 、积分控制参数 K_i 和微分控制参数 K_d 进行了整合。最终通过上升时间,调整时间,最大超调量,1.5 秒时转速,这四个指标相比较,结合各种优化算法与 PID 控制的图像分析,得出 zxyDBO 优化的 PID 控制参数所控制的仿真电机具有更短的稳定时间、更快的目标转速达到速度和更小的超调量,其转速变化曲线明显优于其他智能优化

算法控制的电机。

本研究的意义在于提高微型纯电动汽车从启动到稳定运行的效率,减少所需时间,提高稳定性。不足之处在于可供参考的相关文献实例数量不足。为了未来的前景,需要为实验条件和数据分析引入更科学和创新的方法;纯电动汽车在室内通勤和短程使用方面具有广阔的前景,特别是本文研究的由轮毂电机驱动的纯电动汽车,未来在国外市场可能具有显著的经济效益。

第 5 章 轮毂电机驱动系统台架试验

5.1 引言

为了验证上一章中多策略融合改进蛭螂优化算法对 PID 控制参数的整定效果，在本章通过永磁无刷直流电机试验系统进行试验验证。永磁无刷直流电机控制研究平台以 Matlab 的 Simulink 和 TI 的 DSP 为基础，由自动代码生成 DSP 代码，然后通过仿真器将代码下载到 DSP2837xD 双核处理器上运行。通过对试验图像和试验数据分析，得到 zxyDBO-PID 控制算法控制下的电机转速上升时间、调整时间和最大超调量等数据，以此分析 zxyDBP-PID 程序的可行性、实用性、可靠性与优越性。

5.2 台架试验设备

该章节试验采用功率较小的电机对控制算法 zxyDBO-PID 进行验证以此保证此次试验的安全性。试验设备采用永磁无刷直流电机试验台。



图 5-1 永磁无刷直流电机试验系统

永磁无刷直流电机试验系统如图 5-1 所示，图中 a 是永磁无刷直流电机试验系统的上位机部分，其作用是通过上位机调试三环控制，从而达到控制实物电机转速改变的效果。b 是隔离变压器，可通过调压旋钮直接控制输入电压的大小，，实际输入的电压数值可直接从显示屏观察记录，隔离变压器背面，含有市电接口、

供电开关、各种功能接口。c 是控制箱，里面包含驱动电机控制器，其作用是给轮毂驱动电机提供能量以及达到控制电机的启动停止、正转反转、提速降速等效果。其背面含有各种按钮与串口，包含控制器上电开关、状态指示灯、扭矩传感器上电开关、USB 转串口等。d 是负载驱动器，其作用是改变负载电机的负载大小，用以测试 PID 控制下的驱动电机抗干扰能力的强弱。e 是 DY-FV12 扭矩变送器，用于测量和传输扭矩信号。f 是永磁无刷直流电机试验台架，具体图像如图 5-2 所示。

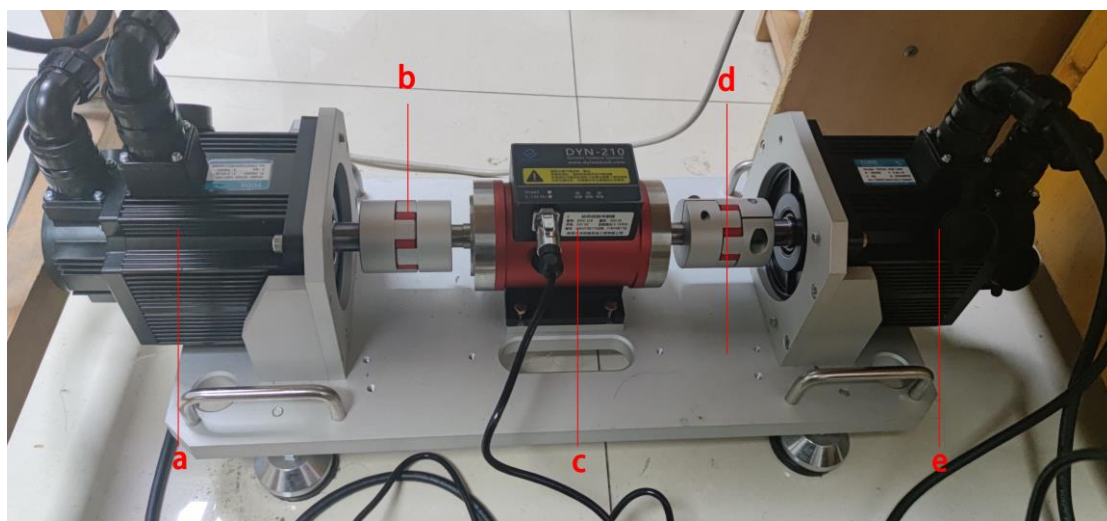


图 5-2 永磁无刷直流电机试验台架

图 5-2 中，a 是负载电机 SVGA-15B11BD，其作用是给予驱动电机负载，模拟实际汽车受到的扭矩大小。b 是联轴器，其作用是连接电机与扭矩传感器，当驱动电机转动时，联轴器可以作为桥梁，带动扭矩传感器的轴进行转动，再借由扭矩传感器的轴带动负载电机的轴进行转动。c 是扭矩传感器 DYN-210，其作用是实时测量和读取扭矩的数值，输送到上位机并且保存数据。d 是永磁无刷直流电机试验板，其作用是固定试验台架各部件，并且使驱动电机、扭矩传感器和负载电机的轴心处于同一水平直线上，保证试验结果的安全可靠。e 是驱动电机 SVGA-15B11BD，其作用是将电能转换为机械能，带动上述各部件转动，可以精确控制设备的运动状态，是实现本课题试验的重要组成部分。

使用 SVGA-15B11BD 型号电机作为本次试验的驱动电机，模拟不同转速的情况下，永磁无刷直流电机驱动的微型纯电动汽车瞬时提速能力、稳定能力和抗干扰能力等。本试验所用实物电机参数如表 5-1。

表 5-1 实物电机参数

电机参数	价值
额定功率(KW)	1.5
额定电压(V)	220
额定电流(A)	6
额定转矩(N · M)	6
峰值转矩(N · M)	18
峰值转速(rpm)	2500
额定转速(rpm)	2500
反电势(V/1000rpm)	69
转矩常数(N · M/A)	1
线电阻(Ω)	1.22
线电感(mH)	3.88
转子惯量(kg · m ²)	0.00126
极数	4
重量(KG)	7.3
绝缘等级	F (155℃)
防护等级	IP65

试验所使用的扭矩传感器型号为 DYN-210，用以实时测量和读取扭矩的数值，输送到上位机保存数据。本试验所用实物扭矩传感器参数如表 5-2。

表 5-2 扭矩传感器参数

电机参数	价值
扭矩信号(KHz)	5-12
响应频率(KHz)	1
消耗电流上限(mA)	200
量程(N · M)	300000
负载电阻(k Ω)	2
转速量程上限(rpm)	10000

永磁无刷直流电机试验系统基于 Matlab/Simulink 和 TI DSP(双核)+CPLD 平台开发，使用先进的 MBD 开发模式，使用可视化界面搭建算法模型，一键自动代码生成，自动部署到控制器中运行，是进行永磁电机控制算法研究的开放式科研平台。其原理是通过自动代码生成 DSP 代码，然后通过仿真器将代码下载到 DSP2837xD 双核处理器上运行。平台主要由控制器 DSP2837xD、DSP 仿真机、

驱动板、伺服电机、扭矩传感器、磁粉制动器等组成，可进行伺服电机的控制接口测试、SPWM 算法开发、VF 算法、FOC 矢量控制算法、滑模控制、无速度传感器算、自抗扰算法等，可进行从 MIL->SIL->PIL 的全流程开发，主要应用方向是永磁无刷直流电机控制方法的验证与研究。平台的控制器采用 DSP2837xD 双核处理器，主频 200MHz,支持 TI 的电机控制库，支持 TI 的伺服控制算法架构，可将控制算法运行在单个核上或者运行 CLA 协处理器上，使用 TI 的快速电流环。平台的系统结构图如下图 5-3 所示。

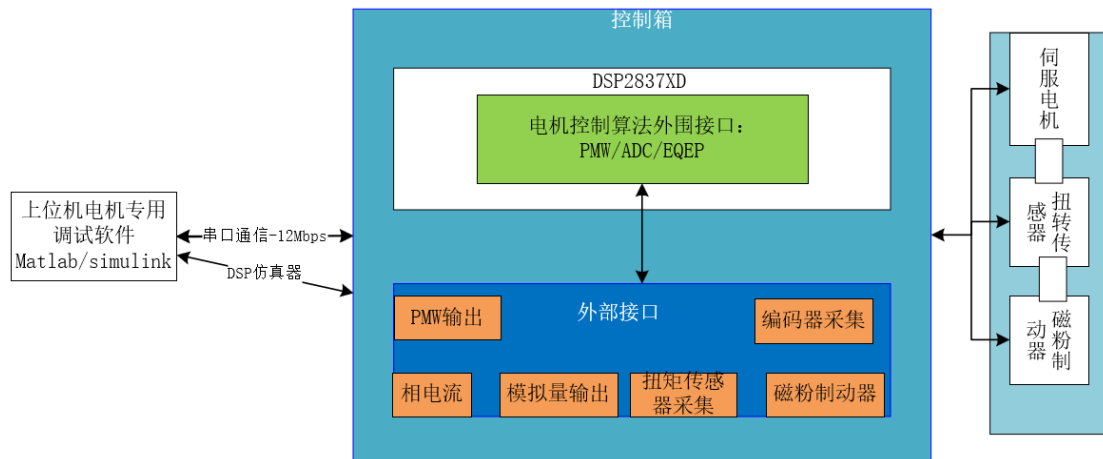


图 5-3 试验台架系统结构图

5.3 台架试验设计

5.3.1 台架试验原理

本试验为验证 zxyDBO-PID 控制算法优化的 PID 控制器实际控制效果与仿真效果是否吻合，实物电机提供的转速、扭矩等是否可以满足实际车轮转动、制动的需求,通过分析不同优化算法下电机的鲁棒性和瞬态响应指标证明 zxyDBO-PID 的有效性与其优越性。PID 控制模型与轮毂电机控制模型如图 5-4 和 5-5 所示。

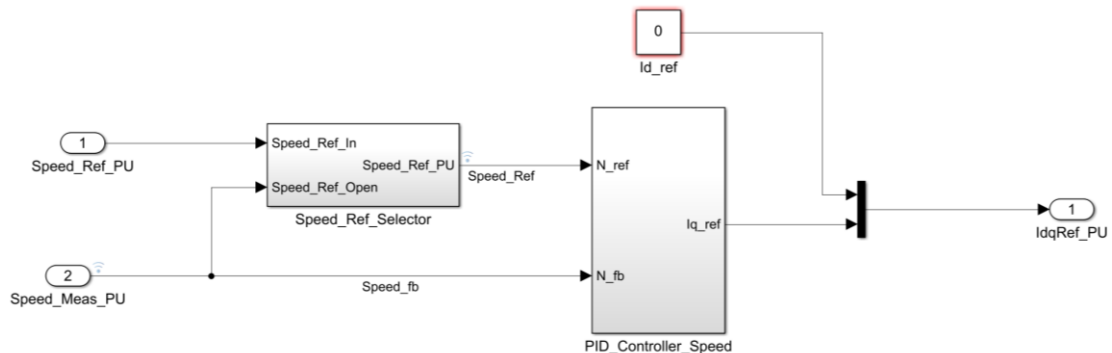


图 5-4 PID 控制模型

图 5-4 中显示的是 PID 控制模块，该控制模型是基于 PI 控制二次开发，共有六个输入，分别连接是轮毂电机实际转速与目标转速的差值、比例环节的数值、积分环节的数值、微分环节的数值、电机的启动信号与电机的终止信号。

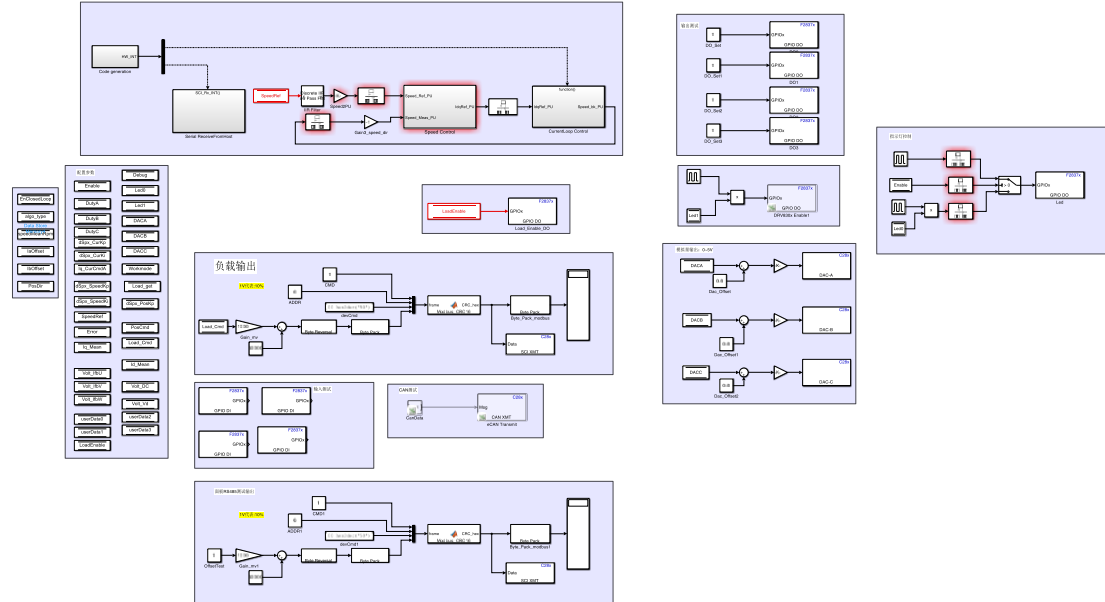


图 5-5 轮毂电机控制模型

图 5-5 中，主要包括速度控制环、电压控制环、电流控制环的三环控制，以及 CAN 通讯模块、PID 控制模块。三环控制和 PID 控制的具体控制原理如下：速度控制环的原理是通过永磁无刷直流电机的实际转速与当前转速作差，然后转化为电信号被控制模块接收，接着得到两者误差的控制算法模块计算新的目标速度再反馈，以此往复循环，最终达到实际转速与当前转速相同且稳定。电压控制模块的原理是通过 PID 控制器对电压大小进行调节，使驱动器获得电压输入波形，并借此对输入电机。电流控制模块则是控制 PID 改变电流的大小，经过电流一系列的读取，最终获取控制效果的信号，并借此将信号传导给电机。CAN 通讯模块的作用是传输，简单理解就是将上位机设置的目标转速发送给轮毂电机驱动控制器，轮毂电机控制器随后根据得到的上位机设置的目标转速进行计算，得到新的占空比。占空比的计算模块通过 Simulink 控制策略模型，也就是上面提到的三环控制等进行编译后下载到轮毂电机驱动控制器中。扭矩传感器的作用则是计算电机转动时单位圈数的脉冲个数除单循环周期的脉冲个数，得到每分钟的转速，而计算出的轮毂电机转速又可以使本身自我反馈，读取轮毂电机发送的输入，

输入到轮毂电机控制器中。负载部分则是通过图 5-3 中的负载控制器调节其数值。全部的永磁无刷直流电机试验设备逻辑如下图 5-6 所示。

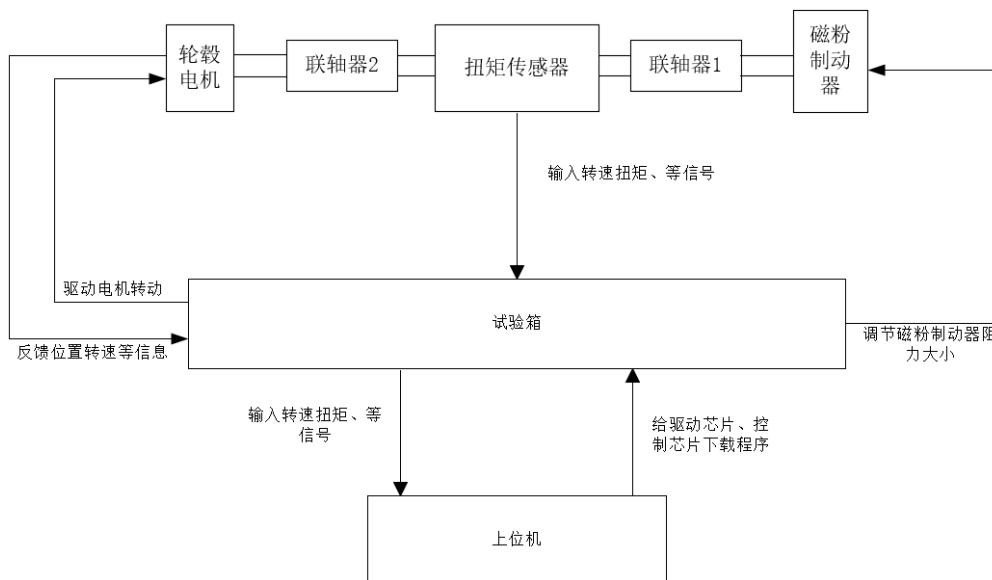


图 5-6 永磁无刷直流电机台架试验原理图

5.3.2 台架步骤设计

为保证电机运行时电机的转速处于安全区域，需时刻注意所施加的负载扭矩不应过大，初始给予的目标转速、电压、或者电流值也不应过大，应该逐步增加，防止电路故障等意外发生。

本章节的试验包含在原有 PI 控制基础上，进行二次开发的 PID 控制的轮毂电机主要分为以下几个步骤：

(1) 检查线缆连接情况，检查正确连接后，再确认 PC 机和控制箱的 2 根 USB 线缆连接，其中一根是串口，另一根是 DSP 仿真器，再按下电压开关，缓慢调整电压强度的旋钮。

(2) 确认试验箱上串口以及驱动口准确连接到上位机电脑的 USB 接口上。

(3) 离线导出 Simulink 模型等相关文件，找到对应本体的 PI 控制，将其控制器删除并且更换成 PID 控制器，做好 PID 控制器的各项配置，保证其与其它模型无冲突。

(4) 运行 Matlab/Simulink 的 slx 文件，软件的 Build Model 对已进行修改的 PID 控制模型进行编译。

(5) 运行电机调试专用软件的监控、三环控制和负载设置等数据调节的电机调试专用软件，进行连接、输入目标转速参和确认串口正确与否。

(6) 点击启动电机，可以进行外部输出信号，按照实验要求，实时监视参数和变量，动态修改参数，观察实验结果。在 Matlab 的工作区有 data 这个名称的数组或者矩阵，使用解码程序可以读取并保存电机的转速、转矩、电压、电流等实际运行的数据和对应的时间数据。

其中流程所使用的上位机的电机调试专用软件的监控、三环控制和负载设置等数据调节如图 5-7 所示，

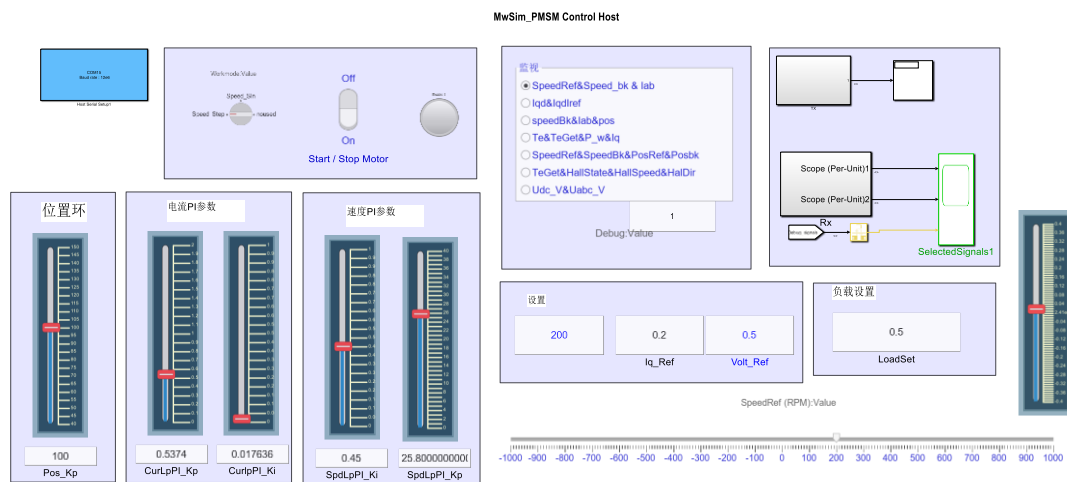


图 5-7 上位机调试数据修改界面

图 5-7 中 Start/Stop motor 部分可以设置电机的启动与停止。三环控制的部分可以设置电机的位置环参数、电流环参数与速度环参数，Debug Value 的职责是监控各项数据的情况，例如，电机实时转速、电流、电压、转矩等数据。设置部分的 200 指的是目标转速，通过改变目标转速来使电机实际速度改变，0.2 是电流大小的百分比，上限为 1，0.2 是电流最大上限的 20%，0.5 是电压大小的百分比，上限为 1，0.5 是电压最大上限的 50%。负载设置部分可以设置负载的大小。

5.3.2 上位机试验操作流程

本次试验上位机所需进行的操作流程如下：

(1) 打开 Matlab，运行名为“mwsim_pmsm_foc_data_10K_1_5kw”的 m 文件，其中包含电机各项参数、电机控制器各项参数、逆变器各项参数等。该步骤可以查看试验所用的 Matlab 相关文件的地址、文件本体、工作区部分数据、电

机转速与转矩的关系图，电机转速与电流的关系图和电机的波德图等。

(2) 打开 Simulink 模型，使用 Simulink 的 AAPS 中 Embedded Coder 功能对模型进行编译。

(3) 编译之后将会生成自动代码，通过生成的自动代码中对应嵌入式源码，找到其 CCS 部分。

(4) 通过 CCS 工程可以进入控制界面，该界面可以通过之前对应编译的控制模型，在此界面改变目标转速、电压大小、电流大小，以此改变实物电机的实时转速，该步骤开始时，预设的目标转速、电压大小、电流大小不应过大，避免驱动电机瞬间受到过大的扭矩，从而产生的危险。

5.4 永磁无刷直流电机台架试验

通过永磁无刷直流电机试验系统进行实物试验，本章节试验一共三组，这是为了保证试验的可靠性，考虑到电机高速运行时存在失速或者崩裂等危险情况，本次试验的目标转速设置为 200rpm;500rpm;1000rpm 共三组，各组之间进行对照试验。图 5-8 为目标转速 200rpm 下开环控制所对应的图像；图 5-9 为目标转速 200rpm 下 PI 控制所对应的图像；图 5-10 为目标转速 500rpm 下开环控制所对应的图像；图 5-11 为目标转速 500rpm 下 PI 控制所对应的图像；图 5-12 为目标转速 1000rpm 下 PI 控制所对应的图像；图 5-13 为目标转速 1000rpm 下 PID 控制所对应的图像。

对比试验所用 PI 控制参数与 PID 控制参数如表 5-3 所示。

表 5-3 试验所用控制参数表

参数	开环控制	PI 控制	PID 控制
Kp	无	0.2687	95.3214
Ki	无	0.0314	13.6603
Kd	无	无	0.4901

5.4.1 台架对照试验（200rpm）

打开 Matlab，运行名为“mwsim_pmsm_foc_data_10K_1_5kw”的 m 文件，打开名为“mwsim_2837xx_foc_SpdLoopMode_SCIA_1_5KW”的 slx 文件，使用

Simulink 的 AAPS 中 Embedded Coder 功能对模型进行编译。通过生成的自动代码对应的嵌入式源码，找到其 CCS 部分。打开 CCS，Debug 程序“mwsim_2837xx_foc_SpdLoopMode_SCIA_1_5KW”，使其运行，上位机便可以实时读取数据。使用默认的 PI 控制以及去除 PI 控制的开环控制做一组 200 转速的低速对照试验。

对试验数据进行计算，得到表 5-4 所示目标转速 200 转下控制效果评价。

表 5-4 目标转速 200rpm 下控制效果评价

控制类型	上升时间	调整时间	最大超调量	1s 时转速
开环控制	0.326	0.331	2.57%	198.41
PI 控制	0.028	0.328	26.51%	201.53

分析表 5-4 数据可知，无优化算法整定的 PI 控制参数效果极差，虽然 PI 控制由于本身的性质，可以快速响应，但是其最大超调量过大，即实际实验中，电机启动时，转速非常不稳定，不仅控制效果非常不理想，且有安全隐患。

图 5-8 与图 5-9 作为目标转速为 200 转的一组对照试验，实际图像如下图所示。

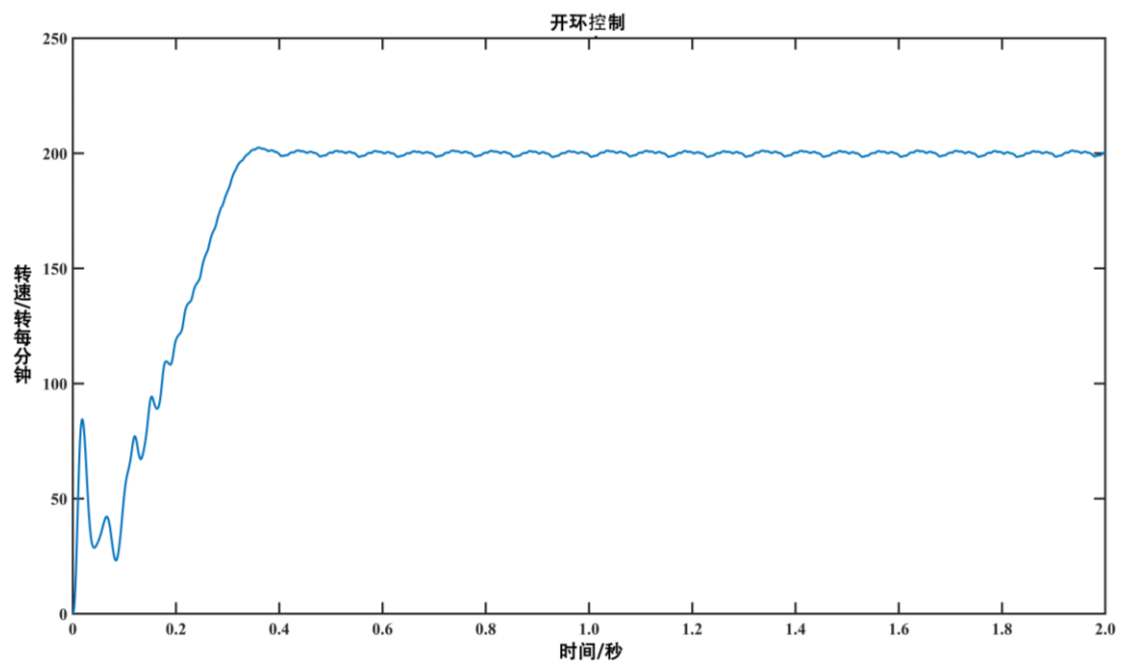


图 5-8 开环控制目标转速 200 转的实物电机转速图像

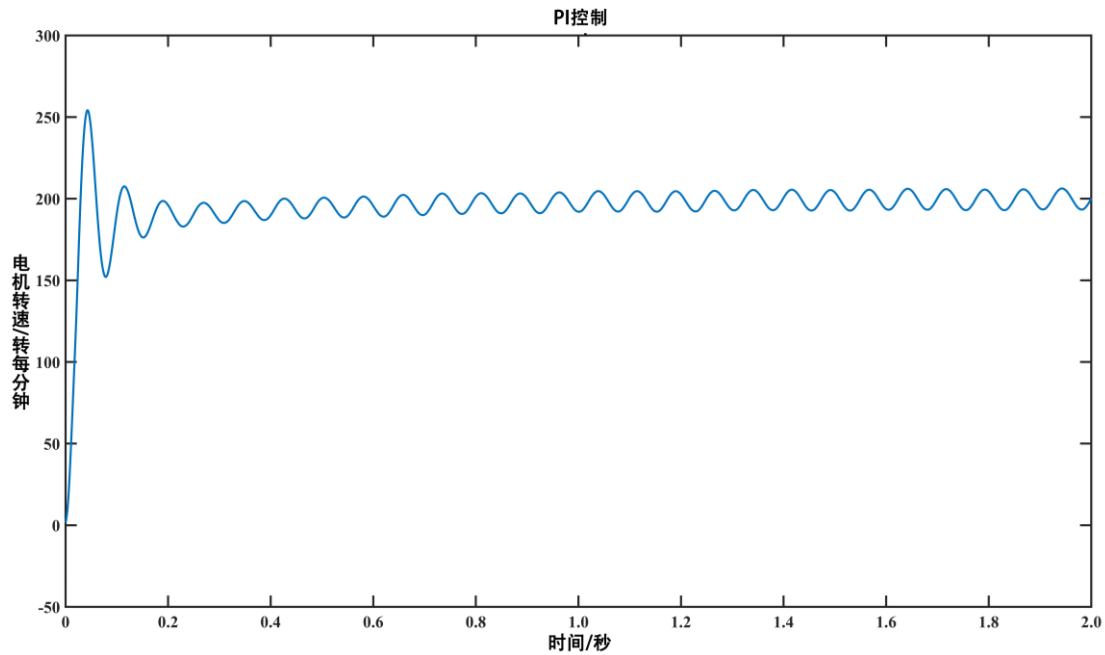


图 5-9 PI 控制目标转速 200 转的实物电机转速图像

图 5-8 所处的开环控制下的实物电机明显有响应速度慢，启动时波动大的缺点，而图 5-9 所处的 PI 控制下的实物电机虽然弥补了响应速度慢的缺点，但依旧存在启动时波动较大，稳定时稳定性甚至不如开环控制的缺点，由此可以得到结论：即 PI 控制下的电机仅有快速性一个优点，其稳定性与准确性都较差，而开环控制仅有稳定性较好一个优点。通过两者上升时间、调整时间、最大超调量的比较，也可以明显看出开环控制和 PI 控制的效果不好。

5.4.2 台架对照试验（500rpm）

重复操作 5.4.1 的步骤，使用默认的 PI 控制以及去除 PI 控制的开环控制做一组 500 转速的中速对照试验。对试验数据进行计算，得到表 5-5 所示的目标转速 500 转下控制效果评价。

表 5-5 目标转速 500rpm 下控制效果评价

控制类型	上升时间	调整时间	最大超调量	1s 时转速
开环控制	0.287	0.303	2.43%	500.07
PI 控制	0.038	不满足条件	43.32%	201.53

分析表 5-5 数据可知，无优化算法整定的 PI 控制参数效果在目标转速为 500 转时，其表现依旧极差，甚至连调整时间都不存在。即使 PI 控制可以快速响应，

但是其最大超调量特别大，存在巨大的安全隐患，且系统稳定性紊乱。

防止单一转速下产生的错误结论，进行图 5-10 与图 5-11 作为目标转速 500 转的新一组对照试验，实际图像如下所示。

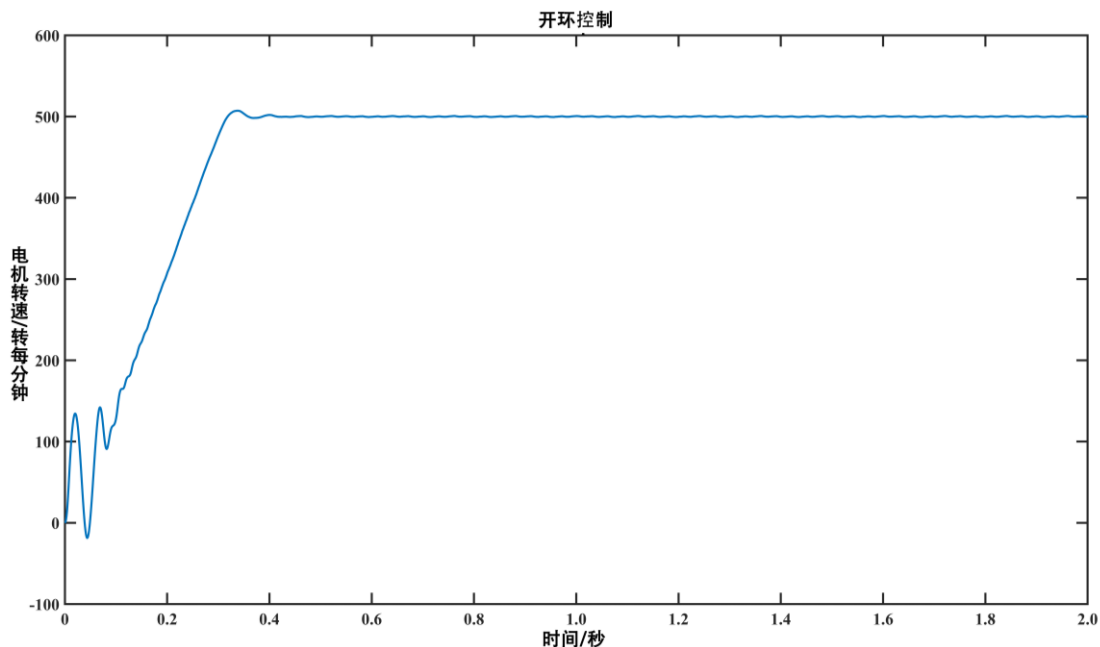


图 5-10 开环控制目标转速 500 转的实物电机转速图像

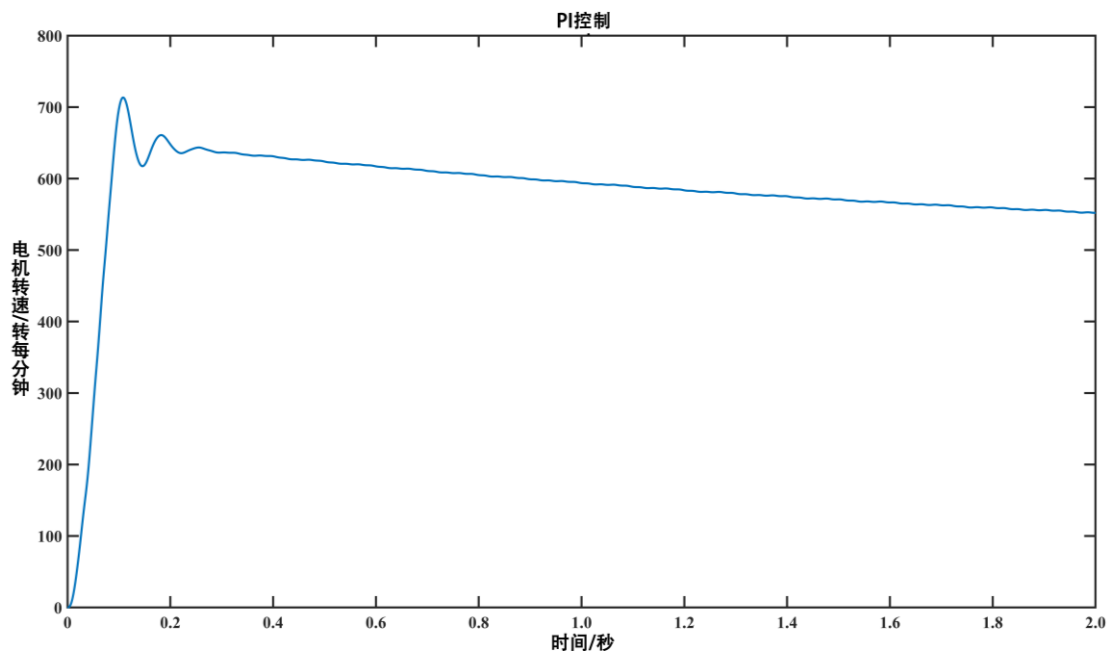


图 5-11 PI 控制目标转速 500 转的实物电机转速图像

在目标转速 500 转的情况下，图 5-10 所处的开环控制下的实物电机依旧明显有响应速度慢，启动时波动大的缺点，并且在此情况下，图 5-11 所处的 PI 控制下的实物电机虽然响应速度较快，但其恢复稳定时的速度极慢，整个电机系统

明显不稳定，其控制效果远不如开环控制，由此可以得到跟目标转速 200 转情况下，相同的结论：即 PI 控制下的电机仅有快速性一个优点，其稳定性与准确性都较差，而开环控制仅有稳定性较好一个优点。通过两者上升时间、调整时间、最大超调量的比较，也可以明显看出开环控制和 PI 控制的效果不好。

5.4.3 台架对照试验（1000rpm）

重复上述步骤，使用默认的 PI 控制和二次开发的 PID 控制做一组 1000 转速的高速对照试验。为体现 zxyDBO-PID 整定控制参数，对电机控制的优秀效果，将离线电机模型结合 zxyDBO-PI 程序与 zxyDBO-PID 程序分别得到的 K_{p1} 、 K_{i1} 与 K_{p2} 、 K_{i2} 、 K_d 对应输入到二次开发更换的 PID 控制模块中，对试验数据进行计算，得到如表 5-6 所示的目标转速 1000 转的控制效果评价。

表 5-6 目标转速 1000rpm 下控制效果评价

控制类型	上升时间	调整时间	最大超调量	1s 时转速
PI 控制	0.262	0.291	1.72%	999.73
PID 控制	0.098	0.179	6.51%	1000.01

分析表 5-6 数据可知，zxyDBO-PI 控制效果与 zxyDBO-PID 控制效果在目标转速为 1000 转时，系统稳定性极好，两者的响应速度极快，控制效果极强。根据数据通过 Matlab 得到图 5-12 与图 5-13。

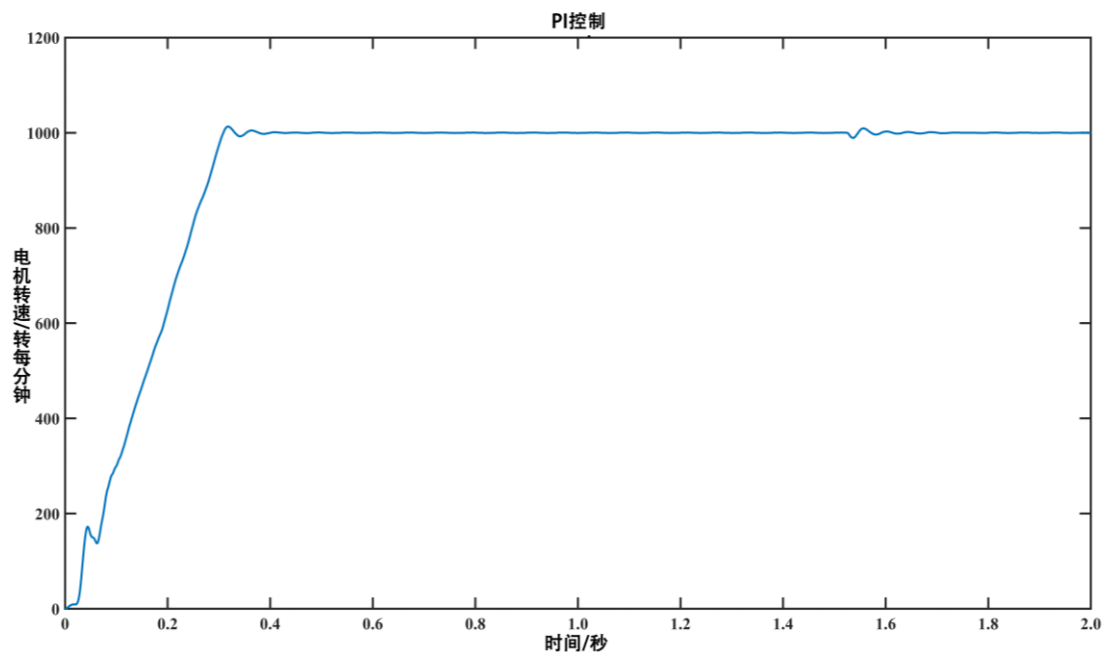


图 5-12 PI 控制目标转速 1000 转的实物电机转速图像

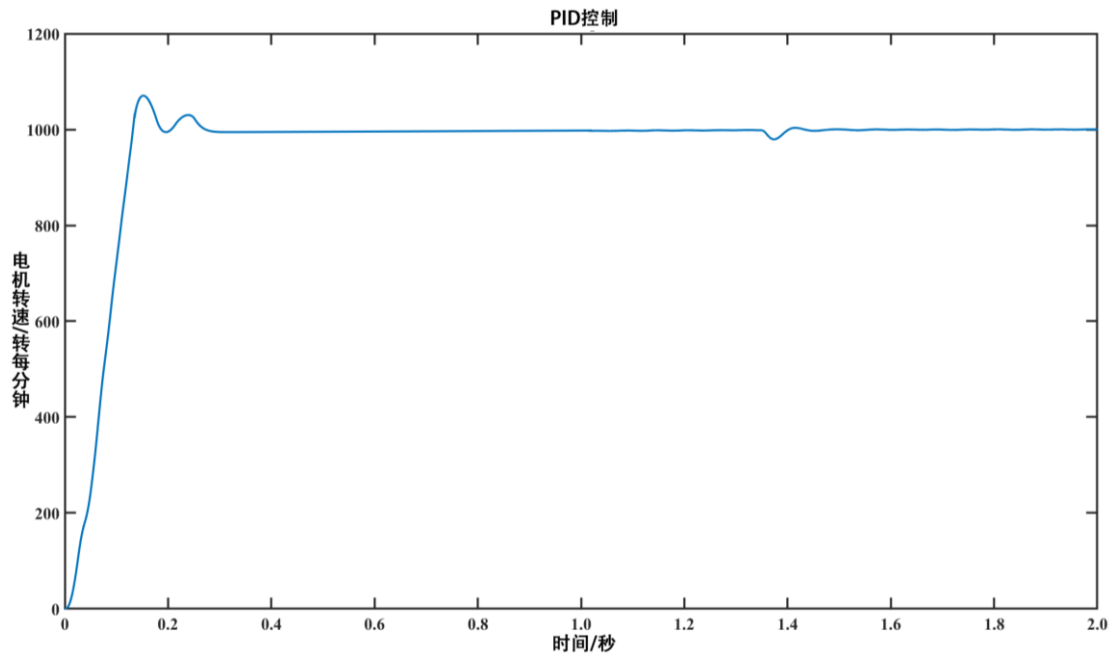


图 5-13 PID 控制目标转速 1000 转的实物电机转速图像

图 5-12 与图 5-13 通过纵坐标电机转速与横坐标时间关系的图像，直接的反应了 zxyDBO 整定控制参数的效果好坏。从图像可以看出，经过 zxyDBO 整定的控制参数，无论是 PI 控制还是 PID 控制，其快速性、准确性和稳定性均远远优越于 200rpm 与 500rpm 的开环控制与预设的 PI 控制，并且 1000rpm 下的 PID 控制电机响应速度明显强于 PI 控制，其稳定速度也强于 PI 控制，且准确性均十分理想。图 5-12 中的 1.6 秒与图 5-13 中的 1.4 秒均有波动，这是外加负载的影响，对稳定时 1000rpm 下的 PI 控制与 PID 控制均手动控制增加负载，其抗干扰能力与鲁棒性均表现出色，几乎无扰动，电机速度稳定极快，外加负载几乎无影响。也就是说，给予电机输出端外加定值负载的情况下，系统的稳定性好，抗干扰能力强，保持原有的电机转速的能力优秀。基本证明了 zxyDBP-PID 程序的可行性、实用性、可靠性与优越性。

5.4.4 台架试验结论

基于优化算法整定后的 PID 控制参数可以使 PID 控制下的永磁无刷直流电机控制电机具有更好的性能。通过对试验图像和试验数据分析，得到 zxyDBO-PID 控制算法控制下的电机转速上升时间和调整时间均优于 PI 控制下电机转速响应时间，并且最大超调量很小，几乎可以忽略的结论，说明系统稳定性好。经过计算，PID 控制算法控制下的电机性能相较于 PI 控制下的，其上升时间优化

了 0.164 秒，调整时间优化了 0.112 秒，最大超调量均在可接受范围内，且 PID 控制算法控制的电机在 1 秒稳定时的转速与目标转速仅有万分之一的误差。而在电机达到目标转速的情况下，给系统施加 0.6 N·M 的默认负载，电机转速基本不出现太大变化，迅速稳定回目标转速，说明整体系统的鲁棒性强，可以很好的保持预设目标转速。基本证明了 zxyDBP-PID 程序的实用性与优越性。

5.5 本章小结

本章在第四章的前提下,结合永磁无刷直流电机控制系统台架试验平台验证 zxyDBO-PID 的控制的可行性、有效性与优越性。永磁无刷直流电机试验台架主要包括硬件系统（平台主要由控制器 DSP2837xD、DSP 仿真机、驱动板、伺服电机、扭矩传感器、磁粉制动器等）、软件系统（Matlab、CCS）、控制算法模型（Simulink 模型、PID 控制算法、PI 控制算法）以及上位机软件（5.3 中详细介绍了使用流程）。zxyDBO-PID 控制算法的控制原理是：通过设置的目标转速与上位机读取的转速进行实时作差，随后将差值与占空比联系，输出到永磁无刷直流电机的四轮轮毂驱动电机控制器里，实时的对电机转速进行一种多退少补的反馈调节，以此改变永磁无刷直流电机的实际转速。通过对试验图像和试验数据分析，得到 zxyDBO-PID 控制算法控制下的电机转速上升时间和调整时间均优于 PI 控制下电机转速响应时间，并且最大超调量很小，几乎可以忽略的结论，说明系统稳定性好。在电机达到目标转速的情况下，给系统施加负载，电机转速基本不出现太大变化，迅速稳定回目标转速，整体系统的鲁棒性强，可以很好的保持预设目标转速。基本证明了 zxyDBP-PID 程序的可行性、实用性、可靠性与优越性。zxyDBO-PID 程序显著强于 zxyDBO-PI 整定控制参数的 PI 控制器，并且 zxyDBO-PI 整定控制参数的 PI 控制器优于原预设参数的 PI 控制器，由此证明了 zxyDBO 对于 PID 控制器与 PI 控制器的效果，证明了其具有良好的有效性和可行性。

第 6 章 结论与展望

6.1 课题总结

四轮轮毂电机驱动微型纯电动汽车在电机驱动方式、汽车本身结构、制动转向等方面相较于轮边电机驱动的纯电动汽车以及传统的纯电动汽车具有明显的优越性。常见的车辆驱动系统有前驱、后驱、四轮驱动等，是保证纯电动汽车性能的基础，并且也是作为纯电动汽车非常重要的组成部分。所以，在我国和国际新能源汽车产业快速发展的当下，我们要抓住时代机遇，跟上时代潮流。因此，有必要对轮毂电机驱动纯电动汽车的构造和运行方式，进行更深入研究，以减少损耗，提高性能。

本课题选用结构简洁、控制灵活、体积小巧的永磁无刷直流电机作为轮毂电机，研究内容广泛，涉及微型纯电动汽车的整车数学模型、Simulink 仿真模型及各模块模型；四轮驱动轮毂电机的数学模型、Simulink 仿真模型及转速控制策略；元启发式算法的逻辑结构、迭代流程及算法优化；以及永磁无刷直流电机试验台架的搭建与实验结果分析。本课题的核心在于通过细致研究 PID 控制算法的参数，优化四轮轮毂电机的性能，增强电机的鲁棒性，从而提升微型纯电动汽车的整体操控性能。研究内容及成果概述如下：

(1) 本课题对微型纯电动汽车进行数学建模，其中包括基于汽车动力学理论搭建的微型纯电动汽车动力学模型，基于电压、电流等之间的关系搭建的电池模型，其他计算模块，如转矩计算模块、车轮车速计算模块等根据微型纯电动汽车进行搭建。在 Simulink 环境下建立四轮轮毂电机驱动微型纯电动汽车各部分的数学模型以及仿真模型并进行仿真试验，通过目标工况下汽车预设的模拟行驶速度情况与仿真结果中的汽车仿真行驶的速度对比得到结论：随着目标工况的不同，汽车仿真行驶的速度可以很好的贴合汽车预设的模拟行驶速度，这证明了本章节搭建的整车模型与其下各模块均具有高度的正确性。

(2) 对永磁无刷直流电机的基本结构和工作原理进行了深入分析，建立了其数学模型和 Simulink 仿真模型。通过对永磁无刷直流电机的仿真数据结果进行

分析,通过对电机转速波形图、电机转矩波形图、电机 Map 图的深入分析,验证了模型的实验适用性,并为 PID 控制算法与 DBO 优化算法的结合奠定了理论基础。

(3) 本课题根据对各种元启发式算法以及永磁无刷直流电机的控制参数优化进行了研究。介绍了四种作为比较算法改进效果优劣、比较算法应用于 PID 控制参数优化效果好坏的元启发式算法,阐述了四种元启发式算法其各自的来源、模拟的生物习性、相应的逻辑代码、逻辑图、优缺点,详细解释了 zxyDBO 改进的方法、作用的阶段、改进优越性。将四种元启发式算法 GWO、BOA、WOA、DBO 与改进后的 zxyDBO 分别作用于相同实验环境下、相同实验条件下的相同永磁无刷直流电机仿真模型,得到对应的仿真数据以及结果。通过对仿真数据以及结果的分析,最终验证了 zxyDBO 的优越性,也证明了系统的准确性、稳定性、快速性得到明显提升。

(4) 搭建了四轮轮毂电机驱动微型纯电动汽车的永磁无刷直流电机驱动系统台架,使用该永磁无刷直流电机驱动系统台架和上位机验证了基于优化算法整定后的 PID 控制参数可以使 PID 控制下的永磁无刷直流电机控制电机具有更好的性能。通过对试验图像和试验数据分析,得到 zxyDBO-PID 控制算法控制下的电机转速上升时间和调整时间均优于 PI 控制下电机转速响应时间,并且最大超调量很小,几乎可以忽略的结论,说明系统稳定性好。经过计算, PID 控制算法控制下的电机性能相较于 PI 控制下的,其上升时间优化了 0.164 秒,调整时间优化了 0.112 秒,最大超调量均在可接受范围内,且 PID 控制算法控制的电机在 1 秒稳定时的转速与目标转速仅有万分之一的误差。而在电机达到目标转速的情况下,给系统施加 $0.6 \text{ N} \cdot \text{M}$ 的默认负载,电机转速基本不出现太大变化,迅速稳定回目标转速,说明整体系统的鲁棒性强,可以很好的保持预设目标转速。基本证明了 zxyDBP-PID 程序的可行性、实用性、可靠性与优越性。

6.2 未来展望

本课题使用 zxyDBO-PID 控制对永磁无刷直流电机转速控制,得到了 6.1 小章节所述的课题总结,得到了良好的结果。但由于客观存在的无法避免的实际问题和信息不足等,依旧还有如下几个值得深入研究和探讨的问题。

(1) 由于经济成本和安全因素的限制，本课题进行的永磁无刷直流电机试验，其所用采用的电机功率、转矩和转速均相对保守，负载电机所给予的负载也相应较低。从而导致了事实上，试验仿真结果的参数存在些许的差距。为解决上述问题，应选择更大的试验场地与更高的成本，使用安全且更高功率与转速的轮毂电机，使实际结果与试验结果一致。

(2) 在 Simulink 搭建的 PID 控制模型需要进一步的改进，对于不同的电压和电流的输出阈值需要更好的兼容，在保证 PID 控制电机转速快速、稳定和准确的前提下，尽量减少电机启动时试验电机的剧烈抖动以及上位机设置电机转速改变过大时存在的突然失速等情况。

(3) 试验结果表明了 zxyDBO-PID 控制的轮毂电机的上升时间、调整时间、最大超调量和鲁棒性得到明显提升，整体系统稳定性得到质的飞跃。但是轮毂电机驱动存在稳态误差较大的问题，为解决此问题，可以考虑建立适应度函数的时候就把稳态误差计算加入进去，并且在 Simulink 模型的设置上改用 PID 的离散设置，同时在实际使用中，要尽可能消除或者减弱 PID 离散模型带来的抖振现象。

(4) 设计求解能力更强的的优化算法，使用其它方法结合改进原有的优化算法，或者使用新的更优秀的优化算法，使优化算法的迭代速度、寻优能力、收敛速度等方面都更好，更加适配模型或实际情况，从而有效提高控制器的控制效果。

参考文献

- [1] Mohanraj D, Gopalakrishnan J, Chokkalingam B, et al. Critical aspects of electric motor drive controllers and mitigation of torque ripple—review[J]. IEEE Access, 2022, 10: 73635-73674.
- [2] 杜克强, 许檬, 李璇, 等. 纯电动汽车用高速电驱动系统发展综述[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(03): 10-16.
- [3] 刘长钊, 张铁, 宋健, 等. 纯电动汽车电驱动系统耦合动力学研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(12): 1896-1909.
- [4] Abdelbaky M, Peeters J R, Dewulf W. On the influence of second use, future battery technologies, and battery lifetime on the maximum recycled content of future electric vehicle batteries in Europe[J]. Waste Management, 2021, 125: 1-9.
- [5] Zhang J, Huang J. Vehicle product-line strategy under government subsidy programs for electric/hybrid vehicles[J]. Transportation Research Part E, 2021, 146: 102221.
- [6] Merhy G, Nait-Sidi-Moh A, Moubayed N. A multi-objective optimization of electric vehicles energy flows: the charging process[J]. Annals of Operations Research, 2021, 296(1): 315-333.
- [7] Li L, Wang Z, Chen L, et al. Consumer preferences for battery electric vehicles: A choice experimental survey in China[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 78: 102185.
- [8] Olschewski J, Fang X. Elastokinematic design and optimization of the multi-link torsion axle – a novel rear axle concept for BEVs[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2025, 53(1): 301-332.
- [9] Kim S, Hwang S, Lee D. A Study on Analyzing Travel Characteristics of Micro Electric Vehicles by Using GPS Data[J]. Applied Sciences, 2025, 15(4): 2113.

-
- [10]Mohammed A R, Aldabbagh A M, et al. Multi-objective ergonomics design model optimization for micro electric cars via response surface methodology[J]. Discover Applied Sciences, 2024, 6(10): 552-552.
 - [11]黄恒, 兰斌旋. 微型纯电动汽车换挡控制研究[J]. 汽车与驾驶维修(维修版), 2024, (03): 40-42.
 - [12]何卫, 高丽仙, 张雪. 微型纯电动汽车的节能技术路径评估[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(19): 1-5.
 - [13]陈瑛. 微型电动汽车电驱控制器堵转工况下散热器测试与仿真[J]. 时代汽车, 2024, (23): 121-123.
 - [14]Johansson M, Eriksson L. Model-Based Design and Evaluation of State-of-the-Art Thermal Management Systems for Electrified Trucks[J]. Energies, 2025, 18(3): 673.
 - [15]Cai L, Yang C, Li J, et al. Study on Frequency-Response Optimization of Electric Vehicle Participation in Energy Storage Considering the Strong Uncertainty Model[J]. World Electric Vehicle Journal, 2025, 16(1): 35.
 - [16]Srinivasan C, Joice C S. Bio-inspired optimizer with deep learning model for energy management system in electric vehicles[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2025, 45, 101082.
 - [17]Mazumdar D, Biswas P K, Sain C, et al. A robust MPPT framework based on GWO-ANFIS controller for grid-tied EV charging stations[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 30955.
 - [18]Chang E C, Tseng Y W, Cheng C A. Control Design of Fractional Multivariable Grey Model-Based Fast Terminal Attractor for High Efficiency Pure Sine Wave Inverters in Electric Vehicles[J]. World Electric Vehicle Journal, 2024, 15(12): 556.
 - [19]Deepak K, Frikha A M, Benômar Y, et al. In-Wheel Motor Drive Systems for Electric Vehicles: State of the Art, Challenges, and Future Trends[J]. Energies, 2023, 16(7): 3121.

- [20] Wang Y. Research on vertical vibration suppression of active suspension driven by in-wheel motor[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2862(1): 012014.
- [21] 薛红涛, 张雨乐, 宋子为, 等. 采用 MPC-MSCA 的四轮毂驱动电动汽车容错控制[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(06): 148-158.
- [22] Zhang H, Xu K, Li Y, et al. Coordination control strategy of motion stability and tire slip for electric vehicle driven by in-wheel-motors[J]. Journal of the Franklin Institute, 2024, 361(15): 107126.
- [23] Yoon D S, Choi S B. Adaptive Control for Suspension System of In-Wheel Motor Vehicle with Magnetorheological Damper[J]. Machines, 2024, 12(7): 433.
- [24] Ito A, Azuma S. Autonomous distributed braking and driving force control architecture based on broadcast control for vehicles with in-wheel motors on four wheels[J]. Advanced Robotics, 2024, 38(9-10): 672-683.
- [25] 张海川, 王姝, 赵轩, 等. 轮毂电机驱动电动汽车 4WS 和 DYC 协调控制[J]. 汽车工程, 2024, 46(10): 1766-1779.
- [26] 付翔, 王纪杰, 朱子旭, 等. 轮毂电机驱动车辆驱动力控制研究[J]. 汽车工程学报, 2023, 13(05): 716-729.
- [27] Chen W, Liang X, Wang Q, et al. Extension coordinated control of four wheel independent drive electric vehicles by AFS and DYC[J]. Control engineering practice, 2020, 101: 104504.
- [28] Silva F L, Silva L C A, Eckert J J, et al. Parameter influence analysis in an optimized fuzzy stability control for a four-wheel independent-drive electric vehicle[J]. Control Engineering Practice, 2022, 120: 105000.
- [29] Saleeb H, Kassem R, Sayed K. Artificial neural networks applied on induction motor drive for an electric vehicle propulsion system[J]. Electrical Engineering, 2022, 104(3): 1769-1780.
- [30] Ao D, Wong P K, Huang W. Model predictive control allocation based on adaptive sliding mode control strategy for enhancing the lateral stability of four-wheel-drive

- electric vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2024, 238(6): 1514-1534.
- [31]Dhamija R, Basak S, Singh A, et al. Advanced control strategies for high performance four-wheel drive electric vehicle. 2022 25th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT), Kaohsiung, Taiwan, China, 2022, pp. 1-6.
- [32]Guo L, Xu H, Zou J, et al. Torque distribution strategy of four-wheel independent drive electric vehicle based on optimal energy consumption. 2020 IEEE 3rd International Conference on Electronics Technology (ICET), Chengdu, China, 2020, pp. 252-256.
- [33]Wang J, Gao S, Wang K, et al. Wheel torque distribution optimization of four-wheel independent-drive electric vehicle for energy efficient driving[J]. Control Engineering Practice, 2021, 110: 104779.
- [34]Lee J E, Kim B W. A Novel Adaptive Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode Control for Direct Yaw Moment Control in 4WID Electric Vehicles[J]. Sensors, 2025, 25(3): 941.
- [35]Lian Y, Chen G, Liu P. Study of Yaw Moment Control Strategy of Four Wheel IndependentDrive Electric Vehicle[J]. Automotive Innovation, 2025, (prepublish): 1-12.
- [36]Yu S, Zhao Y, Lin F, et al. Adaptive Fault-Tolerant Control Strategy for Drive Actuators in Four-Wheel Independent Drive Electric Vehicles[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2024, (prepublish): 1-12.
- [37]Xu X, Ding J, Xiao P, et al. ALSSA-PID control-based wheel-side motor control system for four-wheel-drive electric vehicles[J]. Electrical Engineering, 2024, (prepublish): 1-16.
- [38]Muqet A, Israr A, Zafar M H, et al. A novel optimization algorithm based PID controller design for real-time optimization of cutting depth and surface roughness in finish hard turning processes[J]. Results in Engineering, 2023, 18: 101142.

- [39]曲萍萍, 韩俊杰, 姚槽, 等. 永磁同步电机自整定分数阶 PID 速度控制[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2025, 26(02): 273-280.
- [40]侯佳锐, 李传伟. 基于模糊 PID 的节能型地铁永磁同步电机转速控制[J]. 兵工自动化, 2025, 44(01): 33-37.
- [41]朱嵘涛, 何朝霞, 王腾, 等. 基于模糊自适应 PID 算法的直流电机控制设计[J]. 现代电子技术, 2025, 48(02): 103-108.
- [42]Rohan A, Asghar F, Kim S H. Design of fuzzy logic tuned PID controller for electric vehicle based on IPMSM using flux-weakening[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2018, 13(1): 451-459.
- [43]George M A, Kamat D V, Indiran T. OTA-C Realization of An Optimized FOPID Controller for BLDC Motor Speed Control[J]. IETE Journal of Research, 2023, 69(1): 118-136.
- [44]Dutta P, Nayak S K. Grey Wolf Optimizer Based PID Controller for Speed Control of BLDC Motor[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2021, 16(2): 955-961.
- [45]Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in engineering software, 2014, 69: 46-61.
- [46]Arora S, Singh S. Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization[J]. Soft Computing, 2019, 23: 715-734.
- [47]Mirjalili S, Lewis A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67
- [48]Xue J, Shen B. Dung beetle optimizer: A new meta-heuristic algorithm for global optimization[J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79(7): 7305-7336.
- [49]吉如沁, 秦江涛. 混合策略改进的蜣螂优化算法及其工程应用[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(05): 580-588.
- [50]赵强, 王昊洁, 谢春丽. 基于改进蜣螂优化算法的永磁同步电机参数辨识[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(06): 102-108.

- [51]孙仟硕, 王英博. 融合多策略的改进蜣螂优化算法及其应用[J]. 信息与控制, 2024, 53(05): 631-641+651.
- [52]潘劲成, 李少波, 周鹏, 等. 改进正弦算法引导的蜣螂优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(22): 92-110.
- [53]Li S, Zhu X, Zhou D. Power quality disturbance signal denoising and detection based on improved DBO-VMD combined with wavelet thresholding[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 238: 111193.
- [54]Wang W, Cui X, Qi Y, et al. Prediction Model of Coal Gas Permeability Based on Improved DBO Optimized BP Neural Network[J]. Sensors, 2024, 24(9): 2873.
- [55]Fu J, Wu C, Wang J, et al. Lithium-ion battery SOH prediction based on VMD-PE and improved DBO optimized temporal convolutional network model[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 87: 111392.
- [56]Hang P, Chen X. Towards Autonomous Driving: Review and Perspectives on Configuration and Control of Four-Wheel Independent Drive/Steering Electric Vehicles[J]. Actuators. MDPI, 2021, 10(8): 184.
- [57]Deepak K, Frikha M A, Benômar Y, et al. In-Wheel Motor Drive Systems for Electric Vehicles: State of the Art, Challenges, and Future Trends[J]. Energies, 2023, 16(7):3121.
- [58]杜慧起, 马林旭. 新能源汽车概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2020: 69-70.
- [59]Rongjie Z, Ping X, Rongyun Z, et al. In-wheel motor control system used by four-wheel drive electric vehicle based on whale optimization algorithm-proportional-integral-derivative control[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2022, 14(6):
- [60]马俊杰, 邓超, 严毅, 等. 基于 MATLAB/GUI 的混动车动力性仿真软件开发[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(11): 1-5.
- [61]孙永正, 李献菁, 邓俊, 等. 插电式串联混合动力轿车的选型匹配与仿真[J]. 汽车工程, 2010, 32(12): 1015-1020+1025.

- [62]陈齐平, 田玥, 王亮, 等. 分布式驱动电动汽车操纵稳定性影响因素分析研究[J]. 现代制造工程, 2021, 484(01): 12-16+21.
- [63]Murali M, Arulmozhiyal R. Investigation on modeling and simulation BLDC motor fed universal actuation system[J]. Métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería: Revista internacional, 2021, 37(1): 1-8.
- [64]Mohanraj D, Arul david R, Verma R, et al. A review of BLDC motor: state of art, advanced control techniques, and applications[J]. Ieee Access, 2022, 10: 54833-54869.
- [65]李想, 乔伟, 刘丙森, 等. 永磁直流无刷电机电磁设计与性能分析[J]. 高原农业, 2025, 9(01): 86-99.
- [66]左佳, 赵丽颖, 商荣翔, 等. 微型永磁无刷直流电机的设计与优化[J]. 微特电机, 2024, 52(05): 22-26.
- [67]徐枫哲, 颜赫伟, 顾俊锴, 等. 元启发式算法在特征选择中的应用研究[J]. 福建电脑, 2024, 40(09): 22-25.
- [68]赵畅, 刘允刚, 陈琳, 等. 面向元启发式算法的多无人机路径规划现状与展望[J]. 控制与决策, 2022, 37(05): 1102-1115.
- [69]陈萍. 启发式算法及其在车辆路径问题中的应用[D]. 北京交通大学, 2009.
- [70]Li J, Xie X, Dai L, et al. Dynamic synergy optimization (DSO): An integrated approach of metaheuristic algorithms and PID control for real-time stability enhancement in refrigeration systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2025, 17(3): 100-110.
- [71]Khraibet T J, Kalaf B A, Mansoor W. A new metaheuristic algorithm for solving multi-objective single-machine scheduling problems[J]. Journal of Intelligent Systems, 2025, 34(1): 20240373.
- [72]杨维, 李歧强. 粒子群优化算法综述[J]. 中国工程科学, 2004, (05): 87-94.
- [73]席裕庚, 柴天佑, 恽为民. 遗传算法综述[J]. 控制理论与应用, 1996, (06): 697-708.

- [74]陈华根, 吴健生, 王家林, 等. 模拟退火算法机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, (06): 802-805.
- [75]郎茂祥, 胡思继. 车辆路径问题的禁忌搜索算法研究[J]. 管理工程学报, 2004, (01): 81-84.
- [76]翟荣杰. 基于滑模变结构的电动汽车轮毂电机控制系统研究[D]. 安徽工程大学, 2023.
- [77]Zhang X, and Xiao P, "Research on the Optimization of PID Control for Micro Pure Electric Vehicles Driven by Wheel Motor and Multi Strategy Fusion Improvement of the Beetle Algorithm," 2024 International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA), Dalian, China, 2024, pp. 217-223.
- [78]Zhang X, Xiao P, et al, "Research on PID Parameter Tuning of Micro Pure Electric Vehicles Driven by Wheel Side Motors and Improved Sparrow Algorithm by Combining Multiple Strategies," 2024 International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA), Dalian, China, 2024, pp. 199-205.
- [79]Xu X, Wang M, Xiao P, et al. In-Wheel Motor Control System for Four-Wheel Drive Electric Vehicle Based on CR-GWO-PID Control[J]. Sensors, 2023, 23(19).
- [80]Xu X, Wang M, Xiao P, et al. ALSSA-PID control-based wheel-side motor control system for four-wheel-drive electric vehicles[J]. ELECTRICAL ENGINEERING, 2024.

攻读学位期间取得的成果及参研项目

一、论文

- [1] 多策略结合改进麻雀搜索算法及其在电机控制的应用。(已录用)
- [2] **X. Zhang** and P. Xiao, "Research on the Optimization of PID Control for Micro Pure Electric Vehicles Driven by Wheel Motor and Multi Strategy Fusion Improvement of the Beetle Algorithm," 2024 International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA), Dalian, China, 2024, pp. 217-223
- [3] **X. Zhang**, P. Xiao, and J. Hu, "Research on PID Parameter Tuning of Micro Pure Electric Vehicles Driven by Wheel Side Motors and Improved Sparrow Algorithm by Combining Multiple Strategies," 2024 International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA), Dalian, China, 2024, pp. 199-205
- [4] Xu X, Wang M, Xiao P, et al. In-Wheel Motor Control System for Four-Wheel Drive Electric Vehicle Based on CR-GWO-PID Control[J]. Sensors, 2023, 23(19).
- [5] Xu, Xiaoguang, Ding, Jiale, Xiao, Ping, et al. ALSSA-PID control-based wheel-side motor control system for four-wheel-drive electric vehicles[J]. ELECTRICAL ENGINEERING, 2024.

二、参研项目

- [1] 芜湖市“赤铸之光”重大科技成果工程化项目（2023zc07）。
- [2] 安徽省高校协同创新项目（GXXT-2023-039）。

致谢

时光荏苒，岁月如梭，三年的研究生生涯即将完结，而我也要展开新的篇章，以自己的绵薄之力为社会主义建设添砖加瓦。纵有万般不舍，此刻的心情也无法用言语表达万一。在此，我衷心感谢安徽工程大学对我七年的教育——尚德敏学、唯实惟新，我将致力在今后的生活中知行合一，不忘校训的教导。

首先，我要在此感谢我的导师——肖平教授。肖老师为人谦逊，学识渊博，对学生和蔼可亲，对工作认真负责，感谢老师身体力行为我树立了心目中的榜样。感谢老师对我学习上的谆谆教导以及生活中的关怀备至，衷心的希望老师您身体健康，事业顺利！

其次，我要感谢我的父母。感谢他们对我经济上的支持，性格上的包容，精神上的抚慰。感谢父母一直没有放弃我，让我有机会迷途知返。

再者，我要感谢机械与汽车学院工程学院的所有老师。通过诸位老师的课程，我获益匪浅，学到了受益终生的知识，为我的科研项目打下了坚实的地基。希望我们机械与汽车工程学院越来越强。

同时，我要特别感谢徐晓光教授，王淼同学，丁家乐同学，在实习期间对我的指导和帮助，让我早早地接触到了实物试验，也教会了我软件的应用，使我研究生三年的工作如鱼得水。

然后，感谢我的室友杨礼、李帅以及我亲爱的师弟们。感谢你们一直以来的帮助和陪伴，让我研究生三年多姿多彩，感受到了人与人之间的温暖。

最后，我要感谢金欣乐同学和金呼同学对我学业上的帮助，感谢他们在我学业遭遇困难的时候，对我的鼓励和帮助。

尚德敏学 唯实惟新

