

分类号: TP273

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210330139



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 基于群体智能优化算法的汽车
半主动悬架控制策略研究

论 文 作 者	顾黄一
校 内 导 师	汪石农
校 外 导 师	高 璐
专业学位类别	电子信息 (085400)
研究方向 (领域)	检测技术与自动化装置

论文提交日期: 2024 年 5 月 31 日

分类号: TP273

密 级: 公开

单位代码: 10363

学 号: 2210330139

题 目 基于群体智能优化算法的汽车半主动悬架控制策略
研究

英文并列

题 目 RESEARCH ON AUTOMOTIVE SEMI-ACTIVE
SUSPENSION CONTROL STRATEGY BASED ON GROUP
INTELLIGENT OPTIMIZATION ALGORIT

学生姓名: 顾黄一

校内导师: 汪石农

校外导师: 高 璐

专 业: 电子信息

研究方向: 检测技术与自动化装置

论文答辩日期: 2024 年 5 月 24 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结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 2024 年 5 月 31 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：2024 年 5 月 31 日

指导教师签名：



日期：2024 年 5 月 31 日

基于群体智能优化算法的汽车半主动悬架控制策略研究

摘 要

悬架系统作为汽车的关键组成部分，对车辆的乘坐舒适性和操纵稳定性具有重要影响。被动悬架系统结构简单、价格低廉，但其参数固定，无法根据实际路况进行调整，因此在减振性能方面存在一定的局限性。主动悬架系统在减振性能上表现卓越，其依赖于传感器感知路面的起伏和车身的姿态变化，基于这些实时数据施加阻尼力从而维持悬架系统最佳的减振状态。然而，这种系统的结构相对复杂，且能耗较大。相比之下，半主动悬架通过在被动悬架之上增加主动作动器，使其具备自动调节阻尼的能力，其性能接近主动悬架。不仅如此，半主动悬架系统还拥有相对简单的结构，且能耗较低，因此在汽车工程领域受到了广泛的关注。本文聚焦于汽车半主动悬架系统设计中控制策略这一关键问题进行研究，以二自由度四分之一悬架系统为对象，基于 PID 控制、模糊控制、模糊 PID 控制以及 ANIFS 控制方法，通过融合群体智能优化算法，对控制参数进行优化，并利用 MATLAB 软件搭建了仿真模型。本文主要工作如下：

首先，基于悬架动力学特性，搭建了二自由度四分之一汽车半主动悬架系统的仿真模型；并建立了正弦型路面和 B 级随机路面仿真模型作为半主动悬架系统的激励输入；根据悬架的控制目的制定了相应的半主动悬架系统性能评价指标，以便对悬架系统性能进行

全面而准确的评估。

其次，介绍了 PID 控制的相关原理，设计了基于灰狼优化算法 (Grey Wolf Optimizer, GWO) 的 PID 控制器。在标准 GWO 的基础上，采用 Skew Tent 映射产生混沌序列进行初始化并对收敛因子进行非线性化处理，同时引入高斯变异和贪婪策略更新位置方程。得到改进灰狼优化算法 (IGWO)。仿真结果表明：基于 IGWO 算法的半主动悬架 PID 控制系统展现出显著的有效性，提升了悬架的整体性能。

然后，介绍了模糊控制相关理论，设计了四分之一半主动悬架模糊 PID 控制系统；根据悬架系统特性与专家经验选择了合适的模糊规则，并利用遗传算法的全局优化特性和并行处理能力，对控制系统的量化因子和比例因子进行优化。仿真结果表明：遗传算法优化后的汽车半主动悬架模糊 PID 控制系统，在车辆振动抑制方面展现出比一般模糊 PID 控制和传统模糊控制更为优越的效果。

最后，介绍了自适应神经模糊推理系统 (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System, ANFIS) 的相关原理，设计了一种基于 IGWO 算法的半主动悬架 ANFIS 控制策略。对基于 IGWO 算法优化的半主动悬架 PID 控制系统进行仿真，所得到的仿真数据作为 ANFIS 系统的训练数据和检验数据。仿真结果表明，采用 IGWO-ANFIS 的半主动悬架系统不仅拥有神经模糊系统的自适应学习能力，还结合了 IGWO 算法的全局搜索能力，从而显著提升了汽车悬架的性能。

关键词：半主动悬架，模糊 PID 控制，改进灰狼算法，遗传算法，ANFIS 控制

RESEARCH ON AUTOMOTIVE SEMI-ACTIVE SUSPENSION CONTROL STRATEGY BASED ON GROUP INTELLIGENT OPTIMIZATION ALGORITHM

ABSTRACT

The suspension system is a crucial component of an automobile, significantly affecting both ride comfort and maneuvering stability. Passive suspension systems are relatively simple and inexpensive, but their parameters are fixed and cannot be adjusted according to actual road conditions, resulting in limitations in vibration damping performance. Active suspension system is highly effective in reducing vibrations. It relies on sensors to detect changes in the road surface and vehicle body position, and uses this data to apply damping force to maintain optimal suspension performance. However, this system is relatively complex and requires a significant amount of energy. In contrast, semi-active suspensions add an active actuator on top of the passive suspension, allowing for automatic damping adjustment. This results in performance similar to that of active suspensions. The semi-active suspension system has a relatively simple structure and low energy consumption, making it a popular choice in automotive engineering. This paper focuses on the control strategy in the design of automotive semi-active suspension

systems. The study takes the two-degree-of-freedom quarter suspension system as the object and optimizes the control parameters using a group intelligent optimization algorithm based on PID control, fuzzy control, fuzzy PID control, and ANIFS control methods. The simulation model was created using MATLAB software. The main work of this paper are:

Firstly, a simulation model of the semi-active suspension system of a two-degree-of-freedom quarter-vehicle is constructed based on the suspension dynamics. The model includes a sinusoidal road surface and a class B random road surface simulation model as excitation inputs. Performance evaluation indexes are formulated according to the control purpose of the suspension to make a comprehensive and accurate assessment of the suspension system's performance.

Secondly, the relevant principles of PID control are introduced, and a PID controller based on the Grey Wolf Optimizer (GWO) algorithm is designed. Based on the standard GWO, the Skew Tent mapping is used to generate chaotic sequences for initialization and nonlinearize the convergence factor, while Gaussian variation and greedy strategy are introduced to update the position equation, resulting in the improved gray wolf optimization algorithm (IGWO). The simulation results demonstrate that the semi-active suspension PID control system, based on the IGWO algorithm, is highly effective and enhances the overall performance of the suspension.

Then, the following section introduces the theory related to fuzzy control and outlines the design of a fuzzy PID control system for quarter semi-active suspension. The selection of suitable fuzzy rules is based on the suspension system characteristics and expert experience. The quantization factor and scale factor of the control system are optimized using the global optimization characteristics and parallel processing capability of the genetic algorithm. The simulation results demonstrate that the genetic algorithm optimized fuzzy PID control system of the semi-active suspension in automobiles is more effective in suppressing vehicle vibrations than the general fuzzy PID control and traditional fuzzy control.

Finally, the principles of the Adaptive Network-based Fuzzy Inference System (ANFIS) are introduced, and a semi-active suspension ANFIS control strategy based on the IGWO algorithm is designed. The simulation of the semi-active suspension PID control system optimized using the IGWO algorithm produced input and output data that were used as training and test data for the ANFIS system. The simulation results indicate that the semi-active suspension system with IGWO-ANFIS possesses adaptive learning capabilities of the neuro-fuzzy system and combines the global search capability of the IGWO algorithm. This combination significantly improves the performance of the automobile suspension.

Gu Huang Yi(Electronic Information)

Supervised by Wang Shi Nong

KEY WORDS: semi-active suspension, fuzzy-pid control, improved grey wolf algorithm, genetic algorithm, anfis control

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 汽车悬架系统概述.....	2
1.2.1 汽车悬架系统的组成及分类.....	2
1.3 半主动悬架控制策略概述.....	4
1.3.1 半主动悬架系统控制理论.....	4
1.3.2 群体智能优化算法及其在悬架系统中的应用.....	5
1.4 半主动悬架系统研究现状及发展趋势.....	6
1.4.1 半主动悬架技术研究现状.....	6
1.4.2 半主动悬架的发展趋势.....	7
1.5 本文研究的主要内容.....	8
第 2 章 汽车半主动悬架系统模型的建立.....	10
2.1 悬架系统动力学模型.....	10
2.1.1 车辆悬架模型简介.....	10
2.1.2 基于四分之一车辆的半主动悬架动力学模型的建立.....	10
2.2 路面输入模型.....	13
2.2.1 正弦形式的路面输入.....	13
2.2.2 路面不平度功率谱.....	13
2.2.3 随机形式的路面输入.....	15
2.3 汽车半主动悬架性能的评价指标.....	16
2.4 本章小结.....	17
第 3 章 基于灰狼算法优化的半主动悬架 PID 控制策略	18
3.1 半主动悬架 PID 控制.....	18
3.1.1 PID 控制的原理	18
3.1.2 半主动悬架 PID 控制器设计	19
3.2 基于改进灰狼算法优化的半主动悬架 PID 控制	20
3.2.1 灰狼算法的基本原理.....	20
3.2.2 灰狼算法的改进策略.....	22
3.2.3 基于改进灰狼算法的 PID 控制器参数优化	25
3.3 仿真结果对比与分析.....	26
3.3.1 正弦路面输入下仿真结果及分析.....	26
3.3.2 随机路面输入下仿真结果及分析.....	28
3.4 本章小结.....	30
第 4 章 基于遗传算法优化的半主动悬架模糊 PID 控制策略	31
4.1 模糊控制基本原理.....	31
4.1.1 模糊控制基本原理.....	31
4.1.2 半主动悬架模糊控制器设计.....	32
4.2 基于遗传算法优化的半主动悬架模糊 PID 控制	35
4.2.1 遗传算法的基本原理.....	35
4.2.2 模糊 PID 控制的基本原理	37

4.2.3 半主动悬架模糊 PID 控制系统设计	38
4.2.4 基于遗传算法的模糊 PID 控制器参数优化	41
4.3 仿真结果对比与分析	43
4.3.1 正弦路面输入下仿真结果及分析	43
4.3.2 随机路面输入下仿真结果及分析	44
4.4 本章小结	46
第 5 章 基于 IGWO 算法的半主动悬架 ANFIS 控制策略	47
5.1 ANFIS 控制基本原理	47
5.2 基于 IGWO 算法的半主动悬架 ANFIS 控制	49
5.2.1 基于 IGWO 算法的 ANFIS 应用于半主动悬架的优点	49
5.2.2 基于 IGWO 算法的 ANFIS 控制的结构设计	49
5.3 仿真结果对比与分析	52
5.3.1 正弦路面输入下仿真结果及分析	53
5.3.2 随机路面输入下仿真结果及分析	54
5.4 本章小结	56
第 6 章 总结与展望	57
6.1 全文内容总结	57
6.2 研究展望	58
参考文献	59

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

随着时代的发展，汽车在社会中的普及程度不断提升。消费者在购车时的考虑因素也发生了显著变化，不再仅限于实用性，而更注重乘坐舒适性和操纵稳定性。汽车在行驶过程中，由于道路状况不一和发动机运转等原因，产生的振动不仅影响驾驶员和乘客的舒适体验，还可能对身体健康产生负面影响，甚至影响运输货物的完好性^[1]。

同时，车辆振动还会影响到车辆的附着力和制动性能，为行车安全带来潜在风险。为了有效减缓来自不平整路面和发动机振动对车体的影响，汽车悬架成为汽车中至关重要的组成部分。悬架系统负责连接车身和车桥，通过减振和调节作用，降低由路面不平等因素引起的冲击和振动，同时确保车轮与地面的有效接触。因此，悬架系统的性能直接关系到车辆的行驶安全性以及用户的乘坐舒适性^[2]。

为了满足用户对悬架系统多元化性能的需求，科研人员深入探索了车辆振动机制，推动了悬架系统的持续创新。在汽车发展的初期，考虑到成本因素，汽车制造商普遍采用廉价简易的被动悬架。但随着汽车数量的迅速增长，传统的被动悬架在应对复杂多变路况及极端自然环境下，难以满足用户对于汽车综合性能的需求。

为提升乘坐舒适性和操纵稳定性，价格较高但性能卓越的主动悬架得以崭露头角。与传统的被动悬架相比，主动悬架是一种具备高度可控性的系统。它依赖于传感器来精确感知路面的起伏和车身的姿态变化。基于这些实时数据，主动悬架能够根据用户需求连续或间断地施加阻尼力，有效地控制汽车的振动使悬架性能时刻保持在最佳状态。虽然其性能出色，但是主动悬架的构造相对复杂，并且在使用过程中会产生较大的能耗。半主动悬架则结合了两者的优势。它主要通过被动悬架上增加主动作动器调节阻尼系数来实现对车辆动态性能的控制^[3]。尽管其性能略逊于主动悬架，但半主动悬架系统拥有相对简单的结构和更低的能耗，同时造价低廉，这使得它在汽车工程领域备受瞩目。

半主动悬架系统通过在被动悬架之上增加主动作动器，使其具备自动调节阻尼的能力。在研究半主动悬架系统时，控制器的设计成为关键所在。随着控制理论的不断演进，各种控制方法如 PID 控制、模糊控制、天地棚阻尼控制、神经网络控制等都被广泛应用，以开发适用于车辆半主动悬架的控制算法。因此，针对汽车半主动悬架的控制策略展开深入研究，不仅有助于我们更深入地理解车辆的振动特性，为悬架设计提供有力支撑，推动半主动悬架技术进步，促进悬架智能化发展。

1.2 汽车悬架系统概述

1.2.1 汽车悬架系统的组成及分类

悬架系统的核心功能是链接车身和底盘，同时它还承担着吸收震动、分配载重和调整车身姿态等重要任务。作为车身与车轮之间的关键链接，悬架系统在车辆遭遇颠簸或不平路面时发挥着减震作用，帮助保持车辆的平稳行驶。悬架系统结构上较为复杂，其主要部件包括弹性元件、横向稳定器、导向装置以及减震元件等^[4]。如图 1-1 所示为汽车悬架系统结构。



图 1-1 汽车悬架系统结构图

Figure 1-1 Structure diagram of automobile suspension system

随着汽车技术的不断进步，悬架系统的发展呈现出多样化的趋势。对悬架系统的分类通常根据两个方面，即悬架结构和可控性能。其中，以可控性能为依据可以将悬架系统划分为被动悬架、半主动悬架和主动悬架^[5]。

1、被动悬架

被动悬架是一种基础型悬架系统，其工作原理主要依赖于悬架元件的固有特性，不能主动调整自身参数以适应不同的驾驶状况^[6]。这种悬架系统是结构

最简单和成本最低的一种，通常由弹簧和减震器(避震器)组成。

(1)弹簧：被动悬架系统中的弹簧是主要的弹性元件，负责支撑车身并吸收来自路面的冲击和振动。弹簧的刚度(硬度)决定了悬架的基本特性。

(2)减震器：减震器是被动悬架的阻尼元件，用于减少弹簧的振动幅度，使车辆在行驶过程中更加稳定。减震器通过消耗动能将振动转化为热能，提高驾乘舒适性和操纵稳定性。

被动悬架系统的缺点在于它无法主动适应不同的路况和驾驶状况。车辆在不同的驾驶环境中可能会面临不同的挑战，而被动悬架系统不能主动进行调整以应对这些挑战。相对于半主动和主动悬架系统，被动悬架的响应速度较慢，对车辆的控制能力相对有限。然而，由于其简单和成本较低的特性，被动悬架仍然被广泛应用于许多汽车中，特别是经济型车辆。

2、半主动悬架

半主动悬架系统通过在被动悬架之上增加主动作动器，具有一定的主动调节能力，但仍然依赖于悬架元件的固有特性。这种悬架系统通过使用一些先进的控制技术来实现对悬架特性的适度调整^[7]，以适应不同的驾驶状况和路面条件，关键特点包括：

(1)主动调节能力：半主动悬架系统能够根据驾驶者需求设置不同模式来调整悬架特性，以提高驾驶舒适性和稳定性。这种调节通常涉及悬架减震器的阻尼控制。

(2)实时响应：相对于被动悬架，半主动悬架系统的响应速度更快。它能够更及时地适应不同的路面情况和驾驶需求。

(3)减震器控制：半主动悬架系统中的减震器可以通过电子控制单元(ECU)实时调整阻尼，以减少车身的横摆、纵向俯仰等振动。

(4)不同模式：一些半主动悬架系统可能具有不同的工作模式，例如雪地模式、越野模式等，以满足驾驶者对悬架性能的不同期望。

虽然半主动悬架系统仍然受到悬架元件的固有特性的限制，但它相对于被动悬架提供了更灵活的悬架调节能力。与主动悬架相比，半主动悬架的控制能力和调节范围可能稍有逊色，但它在平衡性能和成本之间提供了一种较为理想的选择，因此在许多中高档车型中得到广泛应用。

3、主动悬架

主动悬架是一种先进的汽车悬架系统，它采用电子控制技术，根据传感器能够实时主动地调整悬架系统的性能，以适应不同的驾驶条件和路面状况^[8]。

主动悬架的关键特点包括：

(1)电子控制：主动悬架系统通过传感器实时监测车辆的运动状态、车速、加速度等信息，悬架 ECU 根据这些数据来调整悬架的特性。

(2)路面感知：主动悬架系统通常具有对路面状况的感知能力，能够根据路面的不平度和类型进行调整，提高车辆在不同路况下的驾驶舒适性和稳定性。

(3)驾驶模式选择：一些主动悬架系统提供多种驾驶模式选择，例如节能模式、越野模式等，以满足驾驶者对悬架性能的不同需求和偏好。

(4)悬架几何调整：主动悬架系统甚至可以实现悬架几何的主动调整，例如主动操控车身的倾斜，以提高车辆的操控性能。

尽管主动悬架系统在悬架综合性能方面具有显著优势，但其成本高昂，能耗巨大且依赖于各类外部传感器，通常只能在少数高端汽车和性能车型中得以应用。

1.3 半主动悬架控制策略概述

1.3.1 半主动悬架系统控制理论

多年来，科研人员在悬架系统控制这一领域进行了研究与探索，总结了如下常见的控制策略：

(1)PID 控制

PID 控制在早期的工程实践中广受欢迎，这得益于其强大的鲁棒性和较小的计算量。然而，传统 PID 控制器存在某些局限性。精度不佳且难以在特定场景下实现稳定控制及其依赖于精确的数学模型等因素对其控制效果造成了严重影响^[9]。因此，虽然单一的 PID 控制在某些情况下仍然有效，但为了更好地满足现代工程的需求，仍需探索更为先进的控制策略。

(2)鲁棒控制

鲁棒控制是一种控制系统设计方法，旨在确保系统在面对参数变化、外部扰动等不确定因素时仍能够保持良好的性能。鲁棒控制方法的设计目标是使控制系统在面对参数不确定性时，系统仍能保持稳定，并满足一定的控制性能要

求。这要求在设计控制器时，要充分考虑系统可能面临的各种不确定性因素，并采取相应的措施来应对这些不确定性^[10]。

(3)随机线性最优控制

最优控制策略结合加权系数和目标函数实现对半主动悬架系统的精准控制。用户驾车过程中常受到非线性因素干扰的影响，为有效抑制这种干扰对汽车悬架系统产生的振动，可以采用随机线性最优控制策略^[11]。通过这一策略，能够更好地优化汽车悬架系统的性能，提升行驶过程中的舒适性和稳定性。

(4)模糊控制

模糊控制运用类似人类大脑模糊思维的控制算法，并借助计算机技术实现^[12]。然而，模糊控制中包含了大量基于专家经验的模糊规则，这使其在很大程度上依赖于科研人员的实际经验。存在偶然性和不确定性，这在一定程度上限制了模糊控制在某些领域的应用。因此，尽管模糊控制具有其独特的优势，但在实际应用中仍需谨慎考虑其适用范围。

(5)神经网络控制

神经网络控制是具有强大的自适应能力的并行分布式的智能控制策略，对于复杂模型系统的控制表现比较出色。因此，神经网络控制可以应用于悬架系统的非线性问题研究中^[13]。该控制策略需要大量的训练数据，因此，在实际应用中，我们需要充分考虑数据的获取和处理问题，以确保神经网络控制能够发挥最佳效果。

1.3.2 群体智能优化算法及其在悬架系统中的应用

群体智能优化算法的灵感源于生物群体的行为模式，通过模拟生物个体间的协作和信息传递机制，来有效地解决各种复杂的优化问题。这类算法通常受到生物学群体行为的启发，其中包括灰狼算法、鲸鱼算法、萤火虫算法、遗传算法等。这些方法通过引入群体智能的概念，使得系统能够以一种集体智慧的方式来适应和解决复杂的优化任务^[14]。传统的优化算法往往局限于寻找局部最优解，并且高度依赖于初始值的设定。而与之相比，群体智能优化算法则在自组织性、调节性以及算法的可执行性方面都展现出优势^[15]。群体智能优化算法不仅具备更强的全局搜索能力，而且能够更好地应对复杂问题的挑战，从而在悬架系统的应用中取得了更好的效果。

在车辆悬架控制领域，遗传算法是最早应用的群体智能优化算法。以此为基础，研究者们进行了一系列的优化工作。例如，东北林业大学的赵强搭建了麦弗逊式悬架模糊 PID 控制系统，利用遗传算法对控制器参数进行了多目标修正，显著提高了悬架稳定性^[16]。北京理工大学的段慧清面对悬架参数需要调整的问题，运用灰狼优化算法寻找最优刚度和阻尼参数，提升了悬架的综合性能^[17]。

除此之外，ABC 算法、WOA 算法、GWO 算法等新颖的优化算法也在悬架控制中得以应用。这些算法不仅复杂度较低，对求解问题没有严格的数学要求，而且收敛速度较快能够逐渐逼近目标函数，稳定性强。研究者们不仅将它们应用于悬架控制器参数的优化，还不断改进这些算法以提高其性能。东北林业大学的詹长书教授利用参数自适应的粒子群算法优化悬架 LQR 控制器参数，提升了汽车行驶平顺性及操纵稳定性^[18]。中北大学的荆航基于轮盘赌策略对 ABC 算法进行改进，使得改进后的算法收敛速度更快、所求解的悬架性能指标目标函数适应度值更低^[19]。

1.4 半主动悬架系统研究现状及发展趋势

1.4.1 半主动悬架技术研究现状

早在 20 世纪 50 年代，Federspiel-Labrosse 便在其著作中率先提出了半主动悬架的构想，为后续的悬架技术发展奠定了基础^[20]。1975 年，Margolis 等人开发了一款阻尼改变范围更大的两级阻尼可调减振器，并应用到车辆半主动悬架系统中^[21]。在 19 世纪 80 年代，美国路特斯公司凭借其技术实力，独立研发了具有创新性的有源半主动悬架系统，并成功申请了相关的发明专利。在随后的几年里，路特斯、沃尔沃等公司也紧随其后，在其多款汽车中引入并安装了这一半主动悬架系统，进一步推动了半主动悬架技术的实际应用与发展。从 70 年代到 90 年代，控制技术经历了从开关控制到常规的线性最优控制，再到计算机控制的飞跃式发展。这种迅猛的发展态势不仅展示了科技在悬架控制领域的巨大潜力，也为汽车行业的持续创新提供了强大的技术支持。20 世纪末，美国学者 A S Cherry 和 R P Jones 是首先将模糊系统应用于半主动悬架控制的先驱^[22]。他们通过一系列的计算和仿真试验，成功地为汽车悬架制定了控制半主动悬架的模糊规则。近些年来，Narwade 和 Mahesh 两位学者也对半主动悬架系统进行了

类似的设计与研究，进一步推动了这一领域的发展^{[23][24]}。

在新中国成立之初，由于国内生产力水平较低、科技进展相对滞后以及科研环境困难重重，我国在半主动悬架领域的研究几乎处于空白状态。然而，随着时代的进步，到了 20 世纪 80 年代中期，以北京理工大学、吉林大学等为代表的一些国内顶级高校开始涉足悬架的现代控制理论、台架实验和整车实验等多个研究领域，填补了国内在悬架系统控制领域的空白，缩小了与国际先进水平的差距。

目前，我国在半主动悬架控制理论研究领域涌现出多位资深专家学者为该项事业的发展做出了显著贡献。其中，郭孔辉院士提出了汽车在实际路面激励的情况下悬架系统参数的选择方法并讨论了有关实验评价的问题^[25]；吉林大学汽车工程学院的管欣教授提出的半主动悬架控制算法和策略通过精确控制悬架的刚度和阻尼变化成功实现了对车辆行驶稳定性和乘坐舒适感的提升^[26]；上海交通大学的喻凡教授利用仿真技术对悬架系统的结构和控制参数进行了全面优化，同时致力于实现整个悬架系统的集成优化，从而实现了在多种工况下都能保持优良性能的目标^[27]；北京理工大学的秦也辰针对不同工况下的半主动控制算法进行了全面分析，提出了基于路面识别的悬架控制策略^[28]。

1.4.2 半主动悬架的发展趋势

尽管半主动悬架系统已经在汽车领域得到了广泛应用，然而其控制策略的单一性却限制了其在应对复杂多变的路况时的性能。此外，系统在运行过程中会消耗大量的汽车发动机动能，这一问题亟待解决，以确保更舒适、更节能的行驶体验。同时，随着科技的持续进步以及用户对汽车综合性能的需求，未来成功打造出控制优越、能效卓越、成本相对较低的半主动悬架系统将成为汽车制造商竞争中的关键因素。这将推动汽车行业朝着更智能化的悬架系统方向迈进，满足消费者对于出行体验的更高期望^[29]。半主动悬架的发展主要存在以下几个方向：

(1) 确保汽车在各种复杂行驶环境中系统的稳定性，必须不断改进传感器和控制器的精确性和可靠性。此外，悬架系统的设计应注重提升鲁棒性和抗干扰性，以确保系统在各种条件下能够安全而高效地运行。这一系列的优化措施旨在满足对悬架系统在复杂行驶环境中稳定性的高要求，从而有效提高汽车整体

行驶安全性。

(2)随着环保意识的提高和能源消耗的日益紧张，半主动悬架系统也将朝着节能和环保的方向发展。通过优化控制策略和材料选择，降低系统的能耗和排放，实现可持续发展。

(3)由于汽车悬架的物理模型难以精确描述，仅依靠数学模型进行控制也存在一定的挑战。随着控制科学的不断发展，许多国内外的控制专家和知名学者已经开发出了多种控制算法。因此，将多种智能控制策略相结合成为一种有效的方法，以提高汽车悬架控制系统的性能和实用性，从而更好地满足人们对汽车行驶品质和安全性的需求^[30]。

1.5 本文研究的主要内容

本文以二自由度四分之一半主动悬架为对象，以改善车身垂直加速度、悬架动挠度、轮胎动位移三项悬架性能的评价指标为目的，提升悬架系统的整体性能。主要内容及章节安排如下：

第 1 章首先介绍了研究背景及意义，然后阐述了悬架系统的机械结构以及被动悬架、半主动悬架、主动悬架的各自特点与优势，简述了主流悬架系统控制相关理论以及群体智能优化算法在悬架系统中的应用，最后对半主动悬架控制技术国内外研究现状进行了总结并概括了未来的发展趋势。

第 2 章首先介绍了汽车动力学研究模型分类，在 Simulink 环境下搭建了四分之一半主动悬架数学模型仿真模型。然后介绍了悬架系统性能综合评价指标。最后根据路面不平度功率谱以及道路不平度的分级标准在 MATLAB 中搭建了 B 级随机路面和正弦路面模型。

第 3 章首先根据 PID 控制原理和悬架模型设计了基于 PID 控制的半主动悬架系统。然后，介绍了标准灰狼算法的基本原理，并针对其初始化方法、搜索机制以及选择策略进行了针对性的改进，提出了 IGWO 算法。将改进后的算法应用于半主动悬架 PID 控制系统的参数整定。最后在正弦路面和 B 级路面两种不同激励输入下进行仿真，绘制了时域内的被动控制、PID 控制、GWO-PID 控制以及 IGWO-PID 控制悬架性能评价指标对比曲线并列出了不同控制策略的均方根值对比表，验证改进灰狼算法对于悬架系统性能的改善。

第 4 章首先介绍了模糊控制和遗传算法原理，分别搭建了模糊控制器和模

糊 PID 控制器。然后设计了遗传算法的优化参数、利用算法在线优化模糊 PID 的量化因子和比例因子并应用于半主动悬架控制系统。最后在正弦路面和 B 级路面两种不同激励输入下进行仿真，绘制了时域内的模糊控制、模糊 PID 控制以及 GA-FuzzyPID 控制悬架性能评价指标对比曲线并列出了不同控制策略的均方根值对比表，验证基于遗传算法的半主动悬架模糊 PID 控制在面对不同路况下相比其他控制策略的优势。

第 5 章首先介绍了 ANFIS 的原理，并说明了基于 IGWO 算法的 ANFIS 的应用于半主动悬架中的优势，设计了一种基于 IGWO 算法的 ANFIS 控制器并应用于汽车悬架控制系统。然后对基于 IGWO 算法优化的半主动悬架 PID 控制系统进行仿真，所得到的输入输出数据作为 ANFIS 系统的训练数据与检验数据。最后分别与 IGWO-PID 控制以及 GA-FuzzyPID 控制悬架性能进行对比，分析不同控制策略之间各自优势与特点。

第 6 章对全文进行分析总结，展望未来需要进行的研究任务。

第 2 章 汽车半主动悬架系统模型的建立

2.1 悬架系统动力学模型

2.1.1 车辆悬架模型简介

车辆动力学模型的选择多种多样，具体选择哪种模型，取决于我们研究的侧重点和需要解决的实际问题。通过合理选择模型，我们能够更准确地描述车辆的运动状态，为后续的控制系统设计和优化提供有力支持。

七自由度整车模型综合考虑了车身的七个自由度参数，这使得模型能够更精确地模拟和评估车辆在不同工况下的动力学和操控性能，并且能够反映车身的垂直、俯仰、侧倾及车轮的垂直振动特性。同时，通过车身的运动姿态角，可以评价车辆的操稳性能。四自由度半车模型考虑车身的质心垂直运动、绕其质心轴的俯仰运动，以及车轮在垂直方向的振动，这种模型对于分析车辆在不同路况下的动态性能响应，以及优化车辆设计以提高行驶安全性具有重要意义。二自由度四分之一车辆模型在车辆动力学研究和仿真中具有广泛的应用，它可以帮助研究人员快速了解车辆的垂向振动特性，评估车辆的乘坐舒适性和操控稳定性^[31]。同时，该模型还可以用于研究不同悬架系统对车辆振动特性的影响，为悬架系统的设计和优化提供理论依据。

模型的复杂性会带来参数设计的挑战，同时可能影响分析结果的精确度，因此必须对模型进行适度的简化。在悬架控制策略的研究过程中，通常选择结构相对简单的二自由度四分之一车辆模型。通过采用这一模型，可以便于实现所设计的算法并且更加高效地测试和优化控制策略，为实际应用中的车辆悬架系统提供有力的技术支撑。

2.1.2 基于四分之一车辆的半主动悬架动力学模型的建立

车辆动力学模型是分析悬架振动特性的基础，汽车系统的振动特性涉及到车身多个结构组件，这些组件相互关联，形成了一个相互耦合的振动体系。尽管四分之一车辆模型忽略了车辆的侧倾、俯仰等复杂因素，但它能够有效地反映汽车在行驶过程中悬架的性能表现。同时本文选择二自由度悬架模型，此模型主要关注簧载质量和非簧载质量的位移这两个自由度，从而在一定程度上代

表示了车辆的振动特性^[32]。此外，由于该模型涉及的参数相对较少，这使得我们在求解过程中能够更为简便地进行后续的验证工作。

本文选用的二自由度四分之一车辆模型如图2-1所示。理论上，半主动悬架通过在被动悬架之上增加主动作动器使其能够自动调节阻尼力。

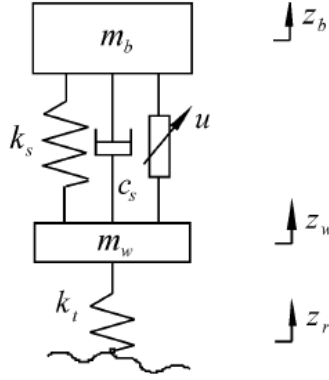


图 2-1 二自由度四分之一半主动悬架模型

Figure 2-1 Two-degree-of-freedom quarter semi-active suspension model

图中， m_b 、 m_w 分别表示车身质量、轮胎质量； k_s 、 k_t 、 C_s 分别表示悬架刚度、轮胎刚度、阻尼系数； z_b 、 z_w 、 z_r 分别表示车身质量垂向位移、轮胎质量垂向位移、路面激励； u 代表主动控制力。

二自由度四分之一半主动悬架模型微分方程：

$$m_b \ddot{z}_b = c_s(\dot{z}_w - \dot{z}_b) + k_s(z_w - z_b) + u \quad (2-1)$$

$$m_w \ddot{z}_w = c_s(\dot{z}_b - \dot{z}_w) + k_s(z_b - z_w) + k_t(z_r - z_w) - u \quad (2-2)$$

定义二自由度四分之一半主动悬架系统的状态空间变量为： $X_1 = z_b - z_w$ ， $X_2 = z_w - z_r$ ， $X_3 = \dot{z}_b$ ， $X_4 = \dot{z}_w$ ；即系统的状态向量为： $X = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4]^T$ ，其中 X_1 ， X_2 ， X_3 ， X_4 分别表示簧载质量位移，非簧载质量位移，簧载质量的速度，非簧载质量的速度。

定义系统输出变量为： $Y_1 = \ddot{z}_b$ ， $Y_2 = z_b - z_w$ ， $Y_3 = z_w - z_r$ ， $Y_4 = \dot{z}_b$ ；即系统的输出向量为： $Y = [Y_1 \ Y_2 \ Y_3 \ Y_4]^T$ ，其中 Y_1 ， Y_2 ， Y_3 ， Y_4 分别表示车身垂向加速度，悬架动行程，轮胎动位移，车身垂向速度。

系统输入向量为 $U = [\dot{z}_r \ u]^T$ ，悬架系统的状态方程可以表示为：

$$\dot{X} = AX + BU \quad (2-3)$$

系数矩阵分别如下：

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_s}{m_b} & 0 & -\frac{c_s}{m_b} & \frac{c_s}{m_b} \\ \frac{k_s}{m_w} & -\frac{k_t}{m_w} & \frac{c_s}{m_w} & -\frac{c_s+c_t}{m_w} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ \frac{1}{m_b} & 0 \\ -\frac{1}{m_w} & \frac{c_t}{m_w} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

悬架系统的输出方程可以表示为：

$$Y = CX + DU \quad (2-5)$$

系数矩阵分别如下：

$$C = \begin{bmatrix} -\frac{k_s}{m_b} & 0 & -\frac{c_s}{m_b} & \frac{c_s}{m_b} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_b} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

选取四分之一悬架模型的参数值如表 2-1 所示。

表 2-1 二自由度四分之一半主动悬架模型

Table 2-1 Two-degree-of-freedom quarter semi-active suspension model

模型仿真参数	数值
车身质量 m_b/kg	320
轮胎质量 m_w/kg	40
悬架刚度 $k_s/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	20000
轮胎刚度 $k_t/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	200000
阻尼系数 $C_s/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	1283

半主动悬架仿真模型如图 2-2 所示。

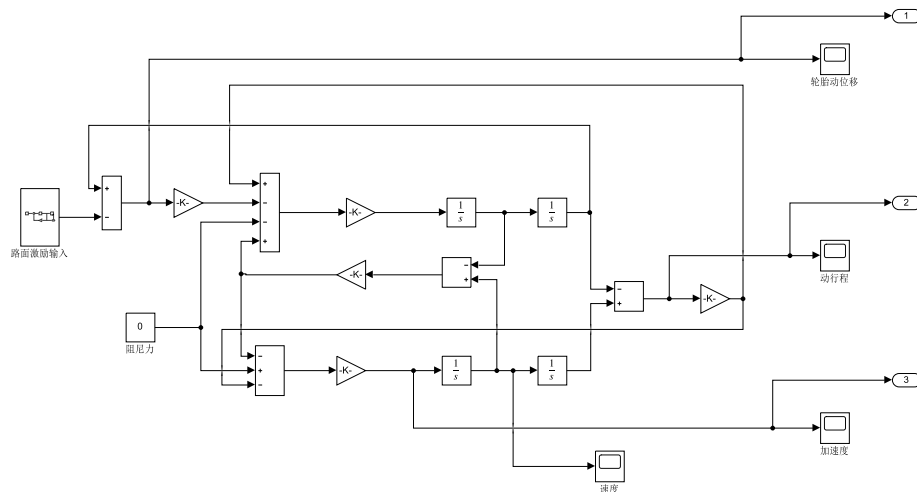


图 2-2 半主动悬架 Simulink 仿真模型

Figure 2-2 Simulink simulation model of semi-active suspension

2.2 路面输入模型

路面模型作为悬架系统的激励输入，是构建汽车悬架系统模型时的关键步骤。路面激励输入可划分为两种形式：随机形式和正弦形式。随机形式是指随着路面方向持续的激励，例如我们在日常行驶中的不平整路面，其特点在于形式多样性且不可预测。而正弦形式则是在行驶过程中遇到规律性起伏路况的情形，是一种理想化的路面模型^[33]。其特点是以正弦波的形式呈现，具有明确的周期性和振幅。

2.2.1 正弦形式的路面输入

本文采用正弦信号来模拟日常行驶过程中遇到规律性起伏路面的情形即正弦形式路面，其表达式为：

$$z_r = A \sin(\omega t) \quad (2-7)$$

式中， A 为简谐振动幅值， ω 为简谐振动频率与车辆自身频率相同，时间 t 为 15 秒。正弦形式的路面输入曲线，如图 2-3 所示。

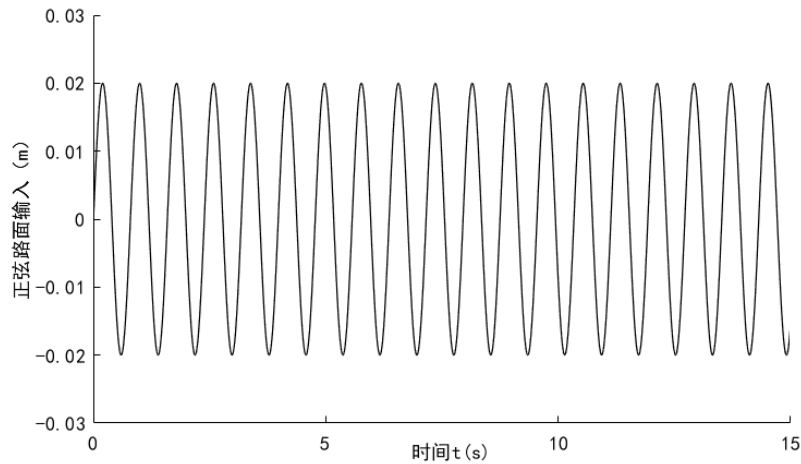


图 2-3 正弦路面激励输入曲线图

Figure 2-3 Input curve diagram of sine road excitation

2.2.2 路面不平度功率谱

路面不平度功率谱是描述路面状况的一个重要技术概念。它主要反映了路面不平度在空间频率或时间频率上的分布情况，从而帮助我们了解路面的平稳程度以及车辆行驶过程中可能遇到的振动情况。路面不平度曲线可以反映出路面的平整度，以及可能由此引发的车辆行驶中的振动情况^[34]。如图 2-4 所示。

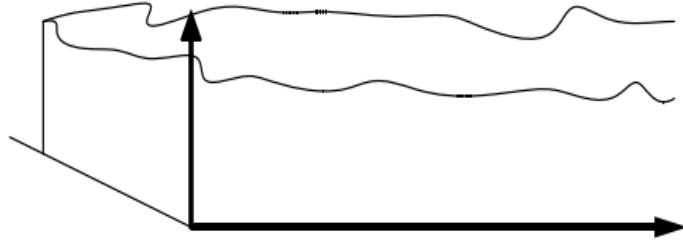


图 2-4 路面不平度曲线图

Figure 2-4 Curve chart of road roughness

路面不平度函数是用于描述路面相对于基准平面变化情况的数学表达。它反映了路面的轮廓特性，是车辆行驶过程中振动和动态响应的重要影响因素。

路面不平度函数可以用下式描述：

$$h(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\Omega) e^{j\Omega x} d\Omega \quad (2-7)$$

振动幅谱可以描述为：

$$\hat{h}(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) e^{-j\Omega x} dx \quad (2-8)$$

若 v 为汽车速度，那么时间 t 和行程 x 之间的关系为：

$$x = vt \quad (2-9)$$

时间圆频率 ω 和行程圆频率 Ω 之间的对应关系为：

$$\omega = v\Omega = 2\pi \frac{v}{L} \quad (2-10)$$

由式(2-8)、(2-9)和(2-10)得出随机形式的路面激励不平度的时域函数为：

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{h}(\Omega) e^{j\omega t} \frac{d\omega}{v} = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{h}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2-11)$$

式(2-11)中

$$\hat{h}(\omega) = \frac{1}{v} \hat{h}(\Omega) = \hat{h}(\Omega) d\Omega \quad (2-12)$$

路面功率谱密度是路面垂直方向位移的功率谱，公式为：

$$\phi_h(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{4\pi}{T} [\hat{h}(\omega)]^2 \quad (2-13)$$

行程圆频率 Ω 的谱密度为：

$$\phi_h(\Omega) = \lim_{X \rightarrow \infty} \frac{4\pi}{X} [\hat{h}(\Omega)]^2 \quad (2-14)$$

路段长度 X 替代周期 T ， $\hat{h}(\Omega)$ 替代 $\hat{h}(\omega)$ 。

引入车速后得到 X 的关系式为：

$$X = vT \quad (2-15)$$

时间圆频率谱密度 $\phi_h(\omega)$ 与行程圆频率谱密度 $\phi_h(\Omega)$ 之间的关系表达式为：

$$\phi_h(\omega) = \frac{1}{v} \phi_h(\Omega) \quad (2-16)$$

若不考虑无规则的不平度系数叠加了周期性分量，则谱密度曲线近似为直线^[35]，可以用式(2-17)表示：

$$\phi_h(\Omega) = \phi_h(\Omega_0) \left[\frac{\Omega}{\Omega_0} \right]^{-\omega} \quad (2-17)$$

式中， Ω_0 代表标准行程圆频率； $\phi_h(\Omega_0)$ 代表不平度的尺度，表示路面不平程度； ω 代表波度性的尺度^[36]。

表 2-2 中列出了道路不平度分级标准。

表 2-2 道路不平度分级标准

Table 2-2 Grading standard of road roughness

等级	不平度的尺度	单位	$\Omega_0 = 2\pi/L_0$	
	$\phi_h(\Omega_0)$	cm^3	上限	不平度评价
	下限	中间值		
A	0	1	2	很好
B	2	4	8	好
C	8	16	32	中
D	32	64	128	差
E	128	256	512	很差

2. 2. 3 随机形式的路面输入

随机形式的路面的不平度激励可用式(2-18)来表示：

$$\dot{z}_r(t) = -2\pi f_0 z_r(t) + 2\pi \sqrt{G_0} w(t) \quad (2-18)$$

式中， G_0 、 w 、 f_0 分别表示路面不平度系数、高斯白噪声、下截止频率。根据式(2-18)搭建的随机形式的路面仿真模型，如图 2-5 所示。

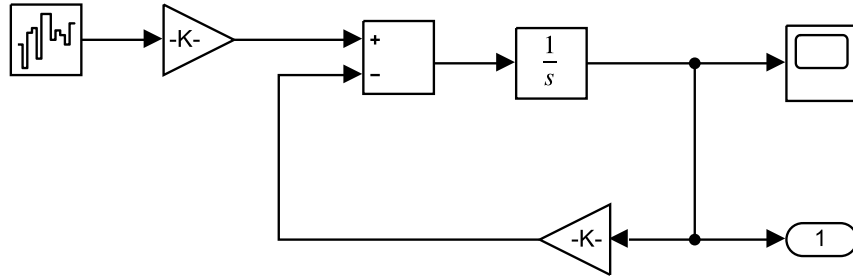


图 2-5 随机路面激励输入仿真模型

Figure 2-5 Input simulation model of Random road excitation

为使所研究悬架系统的性能具有更大的实际应用价值，本文选取我国常见的 B 级随机路面作为系统的激励输入，不平度系数为 $G_0 = 64 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ ，设定车速 $u = 35 \text{ m/s}$ ，下截止频率 $f_0 = 0.01 \text{ Hz}$ 。运行图 2-5 随机路面激励输入仿真模型，得到随机路面激励曲线如图 2-6 所示。

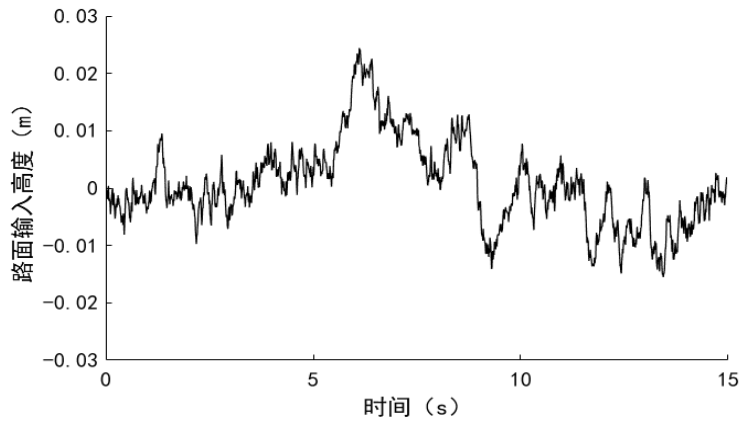


图 2-6 B 级别路面激励输入曲线图

Figure 2-6 Input curve diagram of B-level road excitation

2.3 汽车半主动悬架性能的评价指标

悬架的性能评价涉及多个复杂因素，为了全面评估其性能，需要遵循一套专业的标准。根据国际标准，人体感到最为舒适的车辆振动频率范围在 1 至 1.5 Hz 之间^[37]。此外，为了客观评价悬架性能，我们可以采用车身垂向加速度、悬架动挠度和轮胎动位移这三个关键指标进行综合评估。

(1) 车身垂直加速度

车身垂直加速度是描述汽车在正常行驶过程中，车身在垂直方向上产生的加速度变化的重要参数，表征了车辆行驶过程中车身所产生的振动严重程度^[38]。

其均方根值的数学表达式为：

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ddot{Z}_s(i)^2} \quad (2-19)$$

式中， $\ddot{Z}_s$ 代表车身垂向加速度， N 代表采样长度。

车身垂直加速度的大小受到车身质量比、悬架刚度比等多个参数的影响。因此，车身垂直加速度的变化能够直接反映悬架性能的优劣。

(2) 悬架动挠度

悬架动挠度反映了悬架系统在承受不同路面条件和行驶状态下，对车身垂直运动的控制能力。过大的动挠度而导致车辆的操控性能下降或路面附着力减弱。因此在悬架控制过程中，应控制悬架动挠度的变化量尽可能的小，对提升车辆行驶平顺性就越有利。

(3) 轮胎动位移

轮胎动位移，即车辆在行驶过程中轮胎相对于其静平衡状态时的位置变化量，这个变化量主要影响车辆的操纵稳定性。轮胎动位移过大时，轮胎的附着力会减小从而导致汽车抓地力变弱。因此，在悬架控制系统中，应尽量减小轮胎动位移，以提高车辆的稳定性^[39]。

2.4 本章小结

本章首先介绍了汽车动力学研究模型分类，然后在 Simulink 环境下搭建了四分之一半主动悬架数学模型仿真模型；其次介绍了正弦形式路面、路面不平度功率谱以及道路不平度的分级标准，建立了正弦型路面和 B 级随机路面仿真模型作为半主动悬架系统的激励输入；最后根据控制目地制定了相应的半主动悬架系统性能评价指标，为验证控制策略的有效性奠定了基础。

第 3 章 基于灰狼算法优化的半主动悬架 PID 控制策略

3.1 半主动悬架 PID 控制

PID 控制结构设计相对简单，凭借其广泛的适用性和良好的控制效果，在工程应用中占据重要地位。利用 PID 控制半主动悬架系统，有助于提升车辆行驶的稳定性和舒适性^[40]。

3.1.1 PID 控制的原理

在工业工程领域，PID 控制应用范围十分广泛。具备以下显著特点：

- (1)结构简单，技术成熟、可靠性高；
- (2)应用范围广，控制效果较好；
- (3)鲁棒性强，结构改变灵活。

PID 控制由比例环节、积分环节和微分环节组成，如图 3-1 所示。其作用在于对偏差信号 $e(t)$ 进行纠正。通过反馈机制获取偏差信号 $e(t)$ 后，PID 控制会将其分别经过比例、积分和微分环节处理，并将处理后的结果叠加起来，生成控制变量 $u(t)$ 。这个控制变量随后会作用于被控对象，从而实现对其的精确调控。

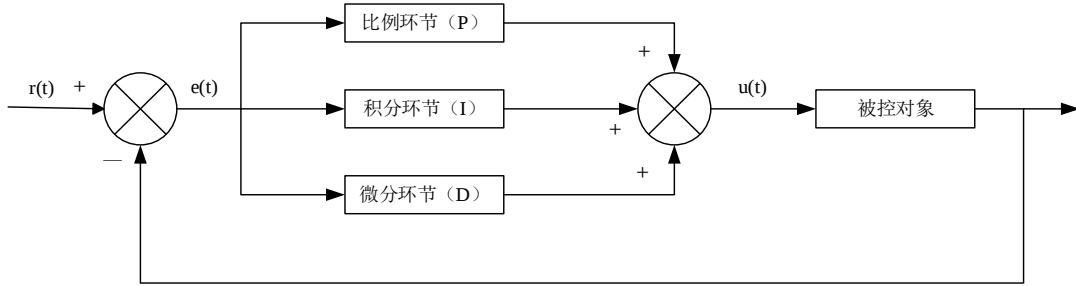


图 3-1 PID 控制原理示意图

Figure 3-1 The schematic diagram of PID control principle

PID 控制的数学表达式为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (3-1)$$

式中， $e(t)$ 为系统偏差信号； K_p 为比例系数， K_I 为积分系数， K_D 为微分系数。

其传递函数形式如下：

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3-2)$$

比例环节的主要作用是产生一个与偏差信号成比例的输出，但容易产生稳态误差。积分环节的主要作用是消除系统的稳态误差，时间常数 T_i 与积分作用的强弱成反比关系，积分环节可能引起超调和震荡现象，如果积分过快，可能引起积分饱和而导致较差的动态性能。微分环节的主要作用是加快系统的动作速度，减少调节时间^[41]。

在本文中，将信号进行离散化处理来实现对系统的精确控制。离散化 PID 数学表达式为：

$$u(t) = K_p \left\{ e(t) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (3-3)$$

式中， $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 分别表示 k 、 $k-1$ 时刻的偏差信号； T 、 k 分别为采样周期和采样序号。

3.1.2 半主动悬架 PID 控制器设计

在 MATLAB/Simulink 环境下搭建的四分之一半主动悬架 PID 控制系统仿真模型如图 3-2 所示。

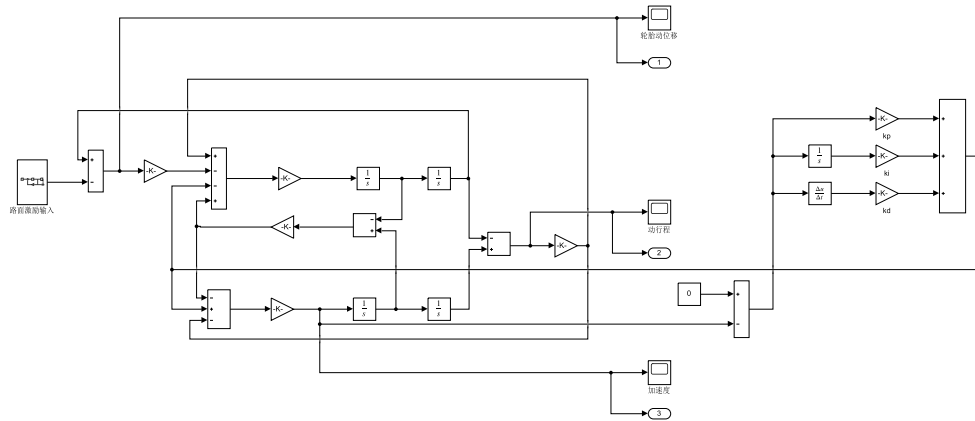


图 3-2 半主动悬架 PID 控制系统仿真模型

Figure 3-2 Simulation model of semi-active suspension PID control system

本文采用试凑法来整定 K_p ， K_i ， K_d 。流程如下：

首先，对比例系数 K_p 进行整定，将积分系数 K_i 和微分系数 K_d 的初始值均设为 0。然后逐步增大 K_p 的取值，并密切观察悬架系统响应曲线的变化。得到一个合适的 K_p 值，使得系统能够快速响应，同时超调量保持在较低数值。如果在此过程中存在稳态误差，那就需要及时引入积分项^[42]。

其次整定积分项系数 K_i 。从小到大逐渐增加 K_i ，观察悬架系统消除静态误差的速度，如果静态误差消除速度过慢则适当减小 K_i ，如果系统出现超调或振

荡则增大 K_I 。得到一个合适的 K_I 值，使系统的稳态误差消除。

最后整定微分系数 K_D 。保持 K_P 和 K_D 的值不变，从小到大逐渐增加 K_D ，观察悬架系统对误差变化的响应，根据系统响应反复调整 K_D ，直至找到一个平衡点使整个悬架系统保持较弱的振荡和较小的超调量^[43]。

通过上述流程反复试凑确定本节所用 PID 控制器的参数值以确保悬架系统达到较好的控制效果。

3.2 基于改进灰狼算法优化的半主动悬架 PID 控制

3.2.1 灰狼算法的基本原理

灰狼优化(Grey Wolf Optimizer, GWO)算法由 Seyedali Mirjalili 于 2014 年提出。其不仅模拟了灰狼群体的捕猎行为，展现了出色的群体智能，而且具有参数设置简单、全局搜索能力强等显著优势。因此，灰狼优化算法在多个领域得到了广泛的应用与发展^[44]。

灰狼社会群体结构分明，形成了一个典型的金字塔式的等级体系，这个体系由四个层级组成： α 层、 β 层、 δ 层、 ω 层，如图 3-3 所示。在这个结构中，位于最顶端的 α 层，即头狼，不仅是灰狼群体的核心领导者，还是最终决策的制定者；紧接着的是 β 层，他们协助 α 层对狼群的行为进行规划和决策；而处于第三层级的 δ 层，他们则服从 α 层和 β 层的领导，并参与群体行为的决策过程；位于最底层的 ω 层，则主要负责执行上层决策，完成所分配的任务。为了有效地利用灰狼优化算法来求解函数的最优解问题，我们设定了一种对应关系：在灰狼种群中，适应度最高的个体被标记为 α ，适应度次高的两个个体分别被标记为 β 和 δ ，而其他个体则统一标记为 ω 。这样，寻找的目标猎物的位置，就等同于函数的最优解^[45]。在灰狼群体的围猎过程中，通常由 α 、 β 和 δ 层担任领导角色，引导狼群中的其他个体完成包围、狩猎和攻击等行为。

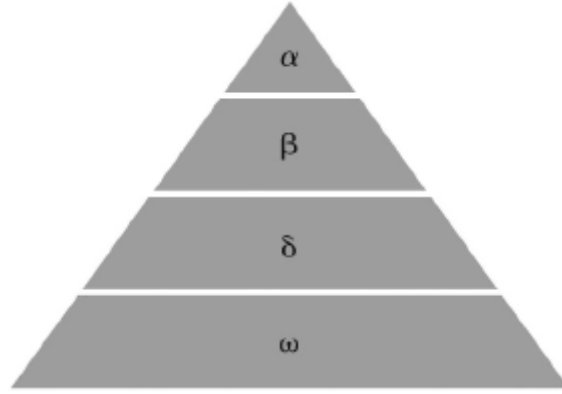


图 3-3 灰狼群体社会等级示意图

Figure 3-3 Schematic of the social hierarchy of a gray wolf pack

灰狼群体狩猎时，狼群在 α 、 β 和 δ 的带领下对猎物进行包围、狩猎和攻击。狼群对猎物的包围可用以下公式描述：

$$D = |CX_p(t) - X(t)| \quad (3-4)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - AD \quad (3-5)$$

式中， $X_p(t)$ 代表猎物位置， $X(t)$ 代表灰狼个体的位置，当前迭代次数表示为 t ； A 和 C 为确定的系数^[46]，其计算公式如下：

$$A = 2ar_1 - a \quad (3-6)$$

$$C = 2r_2 \quad (3-7)$$

式中， r_1 和 r_2 为 $[0, 2]$ 区间内的一维随机向量； A 的取值受到 a 的影响，收敛因子 a 是平衡 GWO 算法勘探与开发能力的关键参数^[47]。

灰狼更新个体位置的数学描述如下：

$$D_\alpha = |C_1X_\alpha - X(t)| \quad (3-8)$$

$$D_\beta = |C_2X_\beta - X(t)| \quad (3-9)$$

$$D_\delta = |C_3X_\delta - X(t)| \quad (3-10)$$

公式(3-8)、(3-9)和(3-10)分别是灰狼个体 ω 到 α 、 β 和 δ 狼的距离。

$$X_1 = X_\alpha - A_1D_\alpha \quad (3-11)$$

$$X_2 = X_\beta - A_1D_\beta \quad (3-12)$$

$$X_3 = X_\delta - A_1D_\delta \quad (3-13)$$

根据公式(3-11)、(3-12)和(3-13)计算每个灰狼的移动方向，再根据公式(3-14)确定灰狼的移动位置。

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (3-14)$$

最终，灰狼群体进行攻击操作，即函数得到最优解。攻击操作主要根据公式(3-6)中 α 的值由 2 递减至 0 来实现。当 $|A| < 1$ 时，灰狼群体接近猎物进行局部搜索，当 $|A| > 1$ 时，灰狼群体远离猎物进行全局搜索^[48]。如图 3-4 所示。

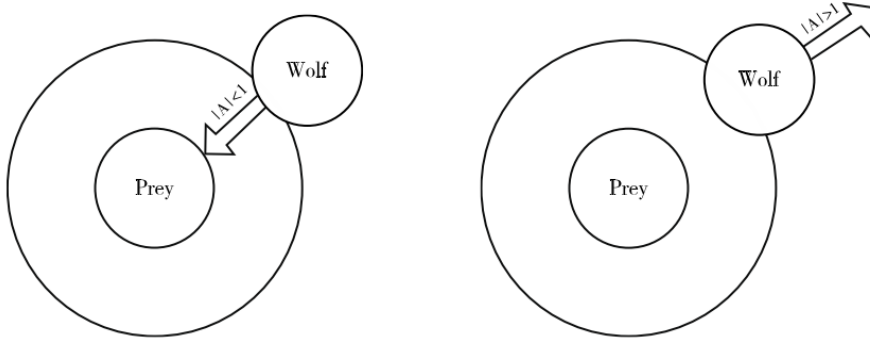


图 3-4 灰狼群体寻找与攻击猎物示意图

Figure 3-4 Schematic diagram of a gray wolf pack searching for and attacking its prey

3.2.2 灰狼算法的改进策略

在标准的灰狼优化算法中，随机生成的初始种群在一定程度上确保了初始位置的均匀分布，但也可能导致部分个体的位置远离最优解，在处理复杂优化问题时，这种情况会影响算法的收敛速度。此外，算法中的收敛因子 a 在平衡搜索与开发能力方面扮演了重要角色。然而， a 的值在算法执行过程中被设定为从 2 线性递减到 0，这种策略虽然简单，但在面对实际优化问题的复杂性时，往往难以适应搜索过程中的实际需求。同时，位置更新机制主要依赖于全局最优个体(即 α 狼)的引导。这种机制虽然赋予算法强大的局部开发能力，但相应地削弱了其全局探索能力。

针对上述不足，本文提出三点改进策略：(1)采用 Skew Tent 映射产生混沌序列初始化灰狼种群以加快算法的全局收敛速度，为算法全局寻优奠定基础。(2)对收敛因子进行非线性化处理，提高全局搜索能力，从而增加发现潜在最优解的可能性。(3)对最优灰狼个体进行高斯变异，避免在求解复杂问题时容易陷入局部最优，提高算法搜索精度。

(1) Skew Tent 混沌映射初始化策略

Skew Tent 混沌映射是一种分段线性混沌映射，初始化策略的关键在于利用 Skew Tent 混沌映射的均匀分布和遍历特性，在解空间中映射出二进制编码形成

初始灰狼群体，这有助于克服灰狼个体随机产生的不均匀性，并提升算法的搜索性能。其数学模型为：

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k / \varphi & 0 < x_k < \varphi \\ x_{k+1} = (1 - x_k) / (1 - \varphi) & \varphi < x_k < 1 \end{cases} \quad (3-15)$$

当 $\varphi \in (0,1)$ 且 $x \in [0,1]$ 时，系统(3-15)处于混沌状态。

以一维种群为例，种群数为 500， φ 设为 4.989，采用 Tent 混沌映射生成的散点图和频率分布直方图如图 3-5 所示。可以看出采用 Tent 混沌映射理论初始化的灰狼算法遍历性更好，增强了全局优化能力。

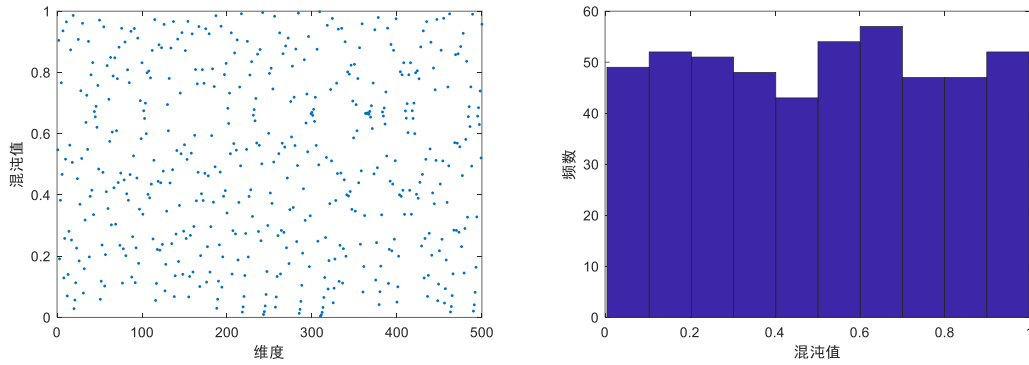


图 3-5 Tent 散点图和频率分布直方图

Figure 3-5 Tent scatter plot and Histogram of frequency distribution

(2) 改进非线性收敛因子策略

系数 $|A|$ 代表了狼群搜索或攻击猎物时的强度，它随着参数 a 的变化而调整，因此， a 的值在协调算法的全局和局部搜索能力上起着决定性的作用。在标准的 GWO 算法中，收敛因子由 2 线性递减到 0。考虑到算法在迭代过程中的收敛性呈现出非线性特征，为更好地适应这种非线性变化，对参数 a 进行如下形式的替换：

$$a = 2 - 2[(e^{t/t_{max}} - 1)/(e - 1)]^k \quad (3-16)$$

式中， k 为非线性调节系数，令 $k=1.4$ 。通过引入非线性的收敛因子调整机制，实现了在算法迭代的初期，收敛因子的衰减速度相对减缓，有助于在搜索过程中增加发现潜在最优解的可能性，而在迭代后期收敛因子的衰减速度加快，有助于加快算法的收敛速度^[49]。改进后收敛因子变化图如图 3-6 所示。

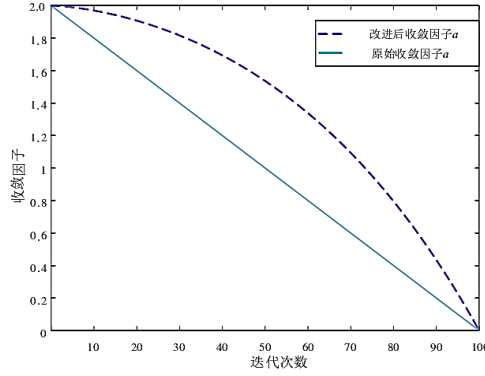


图 3-6 收敛因子变化图

Figure 3-6 Variation of convergence factor

(3) 高斯变异和贪婪选择策略

为进一步增强算法的搜索能力和加快收敛速度，对全局最优个体进行高斯变异，加入高斯变异后的位置更新公式替代原位置更新方程：

$$X(t+1) = X(t+1) \cdot \left| 1 + \frac{|a|}{2} \cdot N(0,1) \right| \quad (3-17)$$

式中， a 为收敛因子； $N(0,1)$ 为标准高斯分布。

结合贪婪选择确定最终的灰狼个体位置，具体操作为：如果高斯变异后的个体位置适应度值小于原来的适应度值，则将高斯变异后的个体位置确定为此次迭代过程个体的最终位置，否则个体位置不变^[50]。具体公式如下：

$$X_{\text{best}}(t) = \begin{cases} X_{ij}^{t+1}, & f(X_{ij}^{t+1}) < f(X_{\text{best}}(t)) \\ X_2(t), & f(X_{ij}^{t+1}) \geq f(X_{\text{best}}(t)) \end{cases} \quad (3-18)$$

根据式(3-17)的位置更新方程可以看出，与原位置更新方程相比，新的更新策略不仅强化了算法的局部开发能力，提高了搜索精度。

综上所述，本文提出的改进灰狼优化算法(记为 IGWO)。算法步骤如图 3-7 所示。

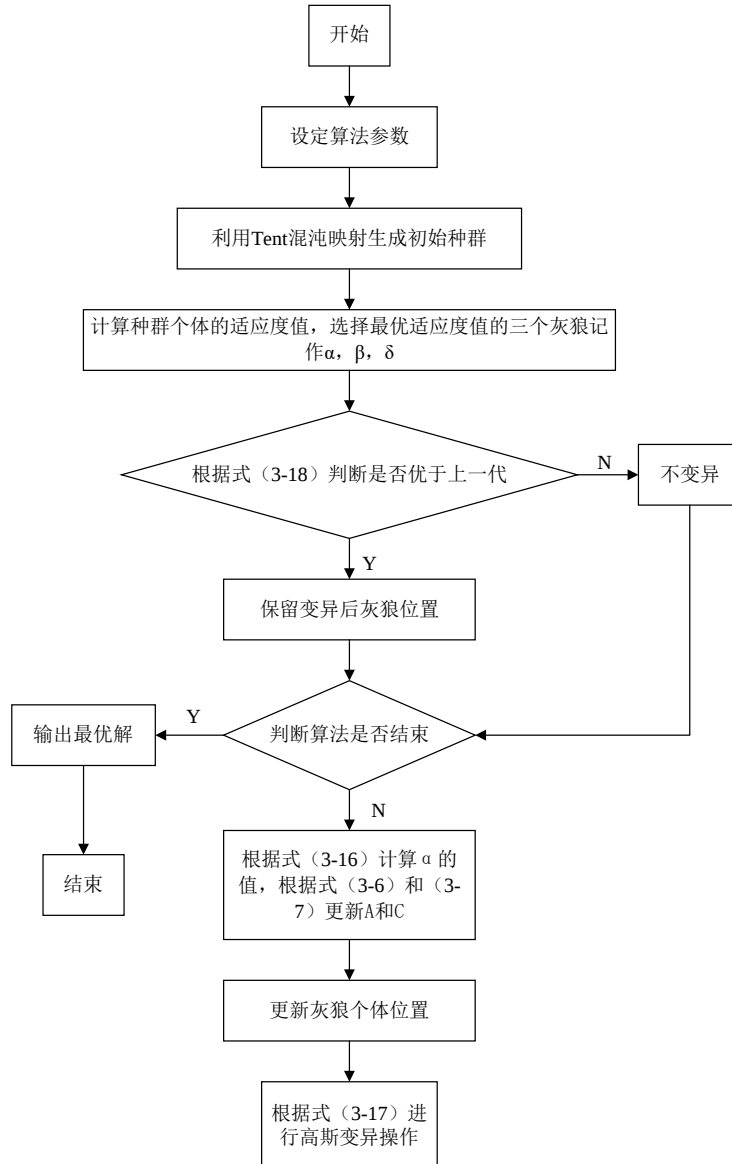


图 3-7 IGWO 算法优化流程图

Figure 3-7 Optimization flowchart of IGWO algorithm

3.2.3 基于改进灰狼算法的 PID 控制器参数优化

通过对 K_p 、 K_i 、 K_d 进行调整, 可以实现汽车悬架系统性能的优化。然而, 这三个参数的取值范围相当广泛, 且手动调整需要丰富的实际经验, 因此在给定的参数范围内或者更广阔参数空间中, 想要找到理想的结果变得尤为困难。为解决这个问题, 可以利用改进后的灰狼优化算法应用于半主动悬架 PID 控制器参数整定, 能够精确地计算出所需的主动控制力。本文选取了车身垂向加速度、悬架动挠度、轮胎动位移作为悬架性能的评价指标。将三个指标各自对应

的半主动悬架均方根值除以被动悬架均方根值，并将它们相加得到算法优化的目标函数，即：

$$\text{minfitness} = \frac{DTD(X)}{DTD_{pas}} + \frac{SWS(X)}{SWS_{pas}} + \frac{BA(X)}{BA_{pas}} \quad (3-19)$$

约束函数为：

$$\begin{cases} DTD(X) < DTD_{pas} \\ SWS(X) < SWS_{pas} \\ BA(X) < BA_{pas} \end{cases} \quad (3-20)$$

式中， $DTD(X)$ 、 $SWS(X)$ 、 $BA(X)$ 分别代表半主动悬架的轮胎动位移、悬架动挠度和车身垂直加速度的均方根值； DTD_{pas} 、 SWS_{pas} 、 BA_{pas} 分别为被动悬架相对应的均方根值。

综上所述，首先明确优化问题的维度为 3，并设定各参数的取值范围。随后，进行算法参数的初始化，设置最大迭代次数为 100，狼群种群大小为 200，以及最小适应度值为 0.1。然后，随机生成灰狼个体，并将这些个体分别赋值给 PID 控制器的 K_p 、 K_i 、 K_d 。运行四分之一悬架的仿真模型，得到目标函数的适应度值。

3.3 仿真结果对比与分析

3.3.1 正弦路面输入下仿真结果及分析

为确保数据的精确性采用固定步长的 ode4 方法进行数值计算，设定采样时间为 0.005 s。运行仿真程序，对比汽车被动悬架系统、采用 PID 控制、GWO-PID 控制和 IGWO-PID 控制策略的汽车半主动悬架系统的各项性能数据。绘制了时域内的悬架性能评价指标对比曲线。如图 3-8、3-9 和 3-10 所示。

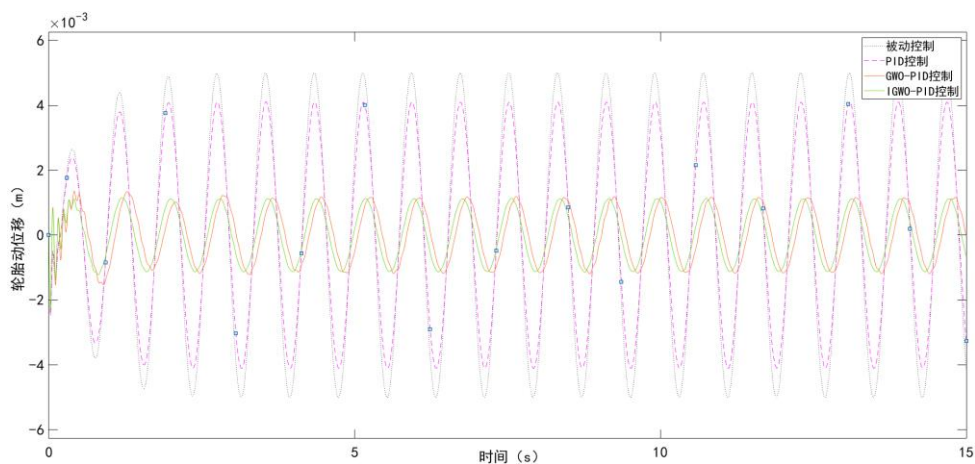


图 3-8 正弦路面轮胎动位移对比图

Figure 3-8 Comparison of dynamic tire displacement on sinusoidal pavements

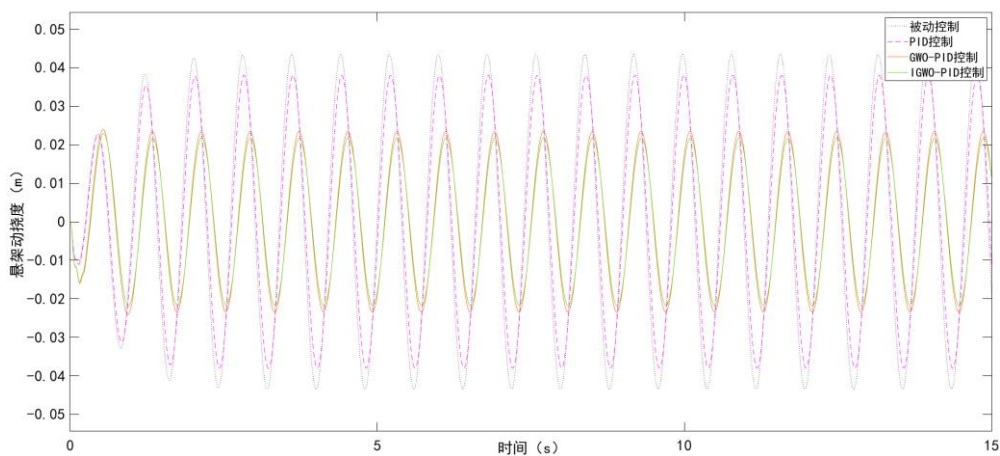


图 3-9 正弦路面悬架动挠度对比图

Figure 3-9 Comparison of dynamic deflections of sinusoidal pavement suspension

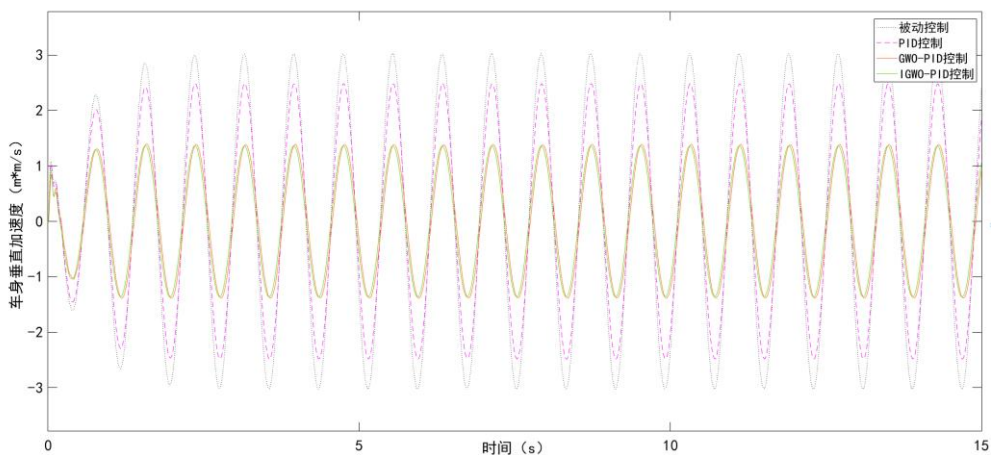


图 3-10 正弦路面车身垂直加速度对比图

Figure 3-10 Comparison of vertical acceleration of body on sinusoidal roads

通过对仿真结果进行计算分析，列出了采用不同控制策略的半主动悬架性

能评价指标的均方根值对比表 3-1。

表 3-1 正弦路面输入下悬架性能评价指标的均方根值

Table 3-1 The root mean square value of suspension performance evaluation index under

控制策略	sinusoidal road input		
	轮胎动位移 /m	悬架动行程 /m	车身垂直加速度 /(m/s ²)
被动控制	0.003346	0.02918	2.023
PID 控制	0.002752	0.02569	1.671
GWO-PID 控制	0.000861	0.01626	0.9450
IGWO-PID 控制	0.000842	0.01560	0.9311

根据表 3-1 的数据可知：在所有控制策略中，基于 IGWO-PID 控制的半主动悬架表现出最为出色的性能改善。对比 GWO-PID 控制策略，采用 IGWO-PID 控制的半主动悬架三个性能评价指标的均方根值分别降低了 2.2%、4.06%和 1.47%。

3.3.2 随机路面输入下仿真结果及分析

在 B 级路面输入下，对比汽车被动悬架系统、采用 PID 控制、GWO-PID 控制和 IGWO-PID 控制策略的汽车半主动悬架系统的各项性能数据。绘制了时域内的悬架性能评价指标对比曲线。如图 3-11、3-12 和 3-13 所示。

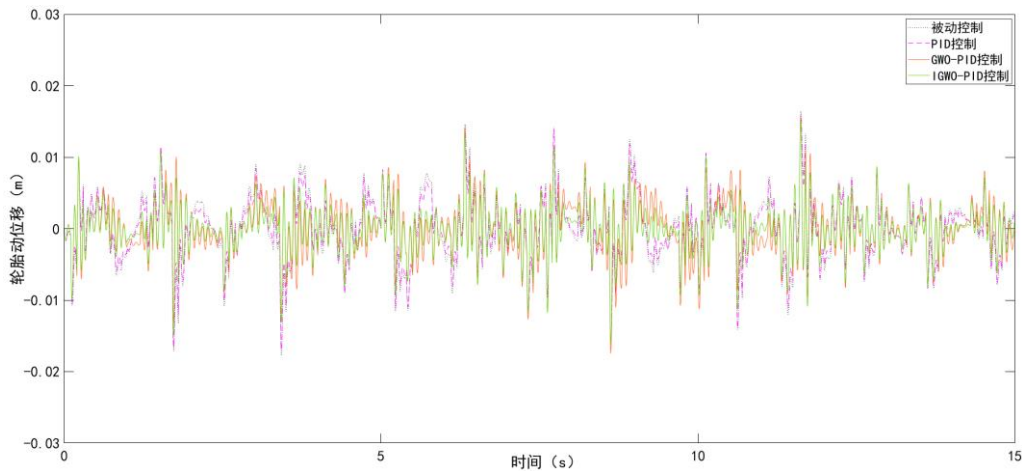


图 3-11 随机路面轮胎动位移对比图

Figure 3-11 Comparison of tire dynamic displacement on random road surface

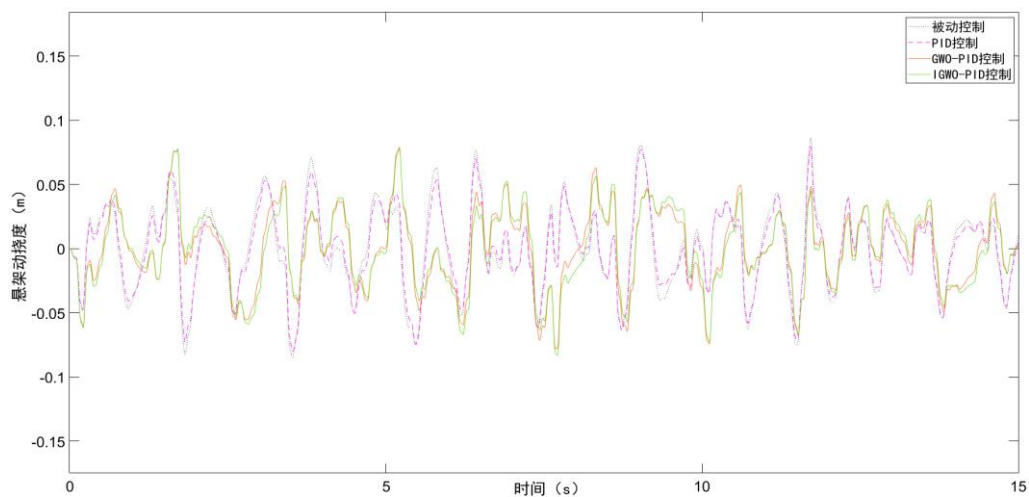


图 3-12 随机路面悬架动挠度对比图

Figure 3-12 Comparison of dynamic deflection of suspension on random road surfaces

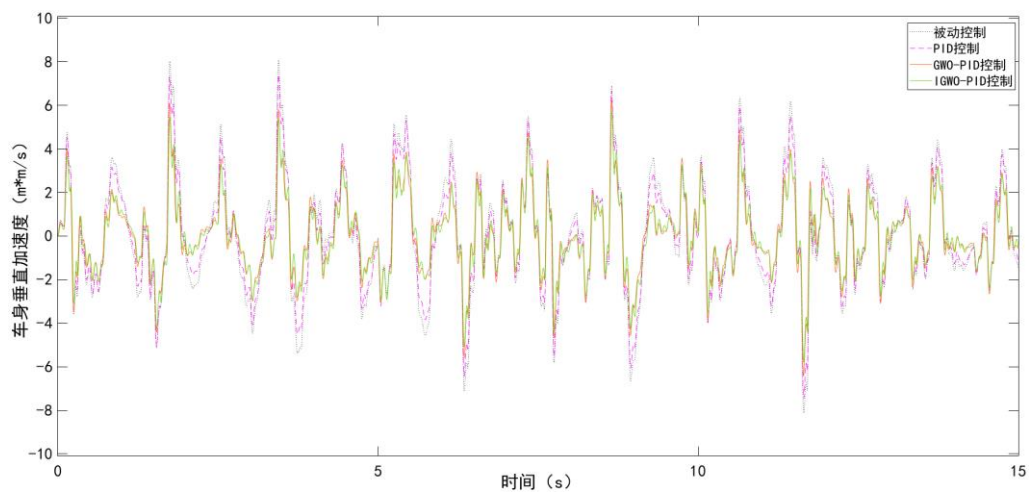


图 3-13 随机路面车身垂直加速度对比图

Figure 3-13 Comparison of vertical acceleration of vehicle body on random road surfaces

通过对仿真结果进行计算分析，列出了采用不同控制策略的半主动悬架性能评价指标的均方根值对比表 3-2。

表 3-2 随机路面输入下悬架性能评价指标的均方根值

Table 3-2 The root mean square value of suspension performance evaluation index under random road inputs

控制策略	轮胎动位移/m	悬架动行程/m	车身垂直加速度 /(m/s ²)
被动控制	0.004681	0.03273	2.590
PID 控制	0.004344	0.03095	2.326
GWO-PID 控制	0.003860	0.03041	1.709
IGWO-PID 控制	0.003516	0.02990	1.643

根据表 3-2 的数据可知：在所有控制策略中，基于 IGWO-PID 控制的半主动悬架表现出最为出色的性能改善。对比 GWO-PID 控制策略，采用 IGWO-PID 控制的半主动悬架三个性能评价指标的均方根值分别降低了 8.9%、1.68%和 3.86%。

3.4 本章小结

本章首先对 PID 控制理论进行阐述，随后在 Simulink 中搭建了基于 PID 控制的半主动悬架系统。然后，介绍了标准 GWO 算法的基本原理，并针对其初始化方法、搜索机制以及选择策略进行了创新性的改进，提出了 IGWO 算法。将改进后的算法应用于 PID 控制器的参数整定。在正弦路面和 B 级路面输入两种不同路况的仿真对比分析中发现相较于标准 GWO 算法，IGWO 算法在整定 PID 参数时展现出更高的求解精度，在半主动悬架 PID 控制方面效果更佳。

第 4 章 基于遗传算法优化的半主动悬架模糊 PID 控制策略

PID 控制，其结构简单、参数调整便捷的特点使得它在具有精确数学模型的控制系统中受到应用。然而，当系统遭受外部因素干扰时，单一 PID 控制对于悬架系统的效果可能不佳。鉴于此，提出融合模糊控制与 PID 控制的模糊 PID 控制策略整定控制系统参数。利用遗传算法对控制系统的量化因子和比例因子进行优化，以实现更为出色的控制效果。

4.1 模糊控制基本原理

4.1.1 模糊控制基本原理

在传统的控制领域内，系统的数学模型越精确，对动态过程的把握就越准确，控制效果也越好。然而，实际中的系统往往具有非具体性、时变性以及非线性等特点，这些特性使得系统难以用精确的数学语言来描述，传统控制方法因此无法适用^[51]。

在这种情况下，模糊控制方法应运而生，为解决这类问题提供了有效的途径。模糊控制不依赖于精确的数学模型，而是通过对系统的模糊描述和模糊规则的设计，来捕捉系统的动态特性并做出相应的控制决策。这使得模糊控制方法能够处理那些难以用精确数学语言描述的系统，特别是那些具有非具体性、时变性和非线性的系统。即使系统参数发生变化或存在外部干扰，模糊控制也能通过调整模糊规则来适应这些变，保持较好的控制效果。此外，模糊控制还结合了人的经验和知识，能够充分利用这些先验信息来提高控制性能。在汽车控制系统中，模糊控制可以用于发动机控制、制动系统以及悬架控制等方面，提升汽车的整体性能。

模糊控制的基本流程可以概括为以下几个步骤：首先，传感器测量被控对象的输出信号并与参考输入信号进行比较得到一个偏差值。然后，利用 A/D 转换器将偏差值从模拟信号转换为数字信号，同时将偏差值进行模糊化处理。其次，根据制定的模糊规则进行模糊推理，将推理结果进行清晰化处理通过 D/A 转换器转化为数字信号，实现对控制对象的精确控制^[52]。这一过程体现了模糊控制从信号采集、处理到控制输出的完整流程，展现了其在复杂系统控制中的

独特优势。它的控制原理框图如图 4-1 所示。

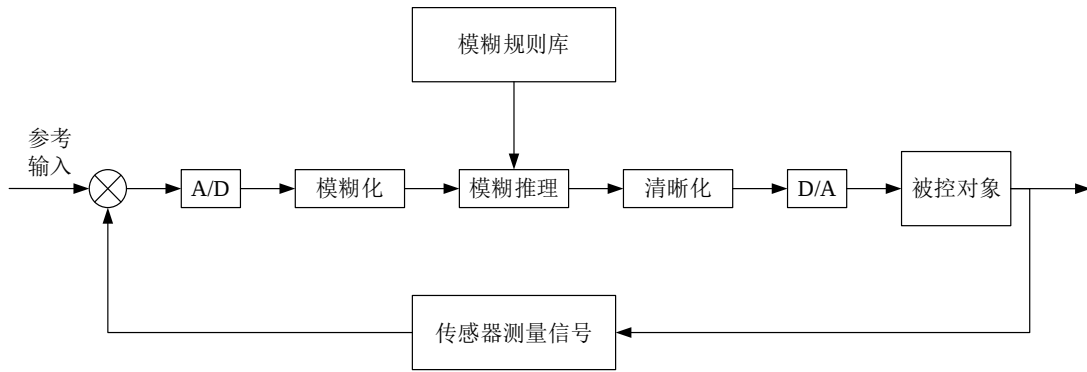


图 4-1 模糊控制系统原理框图

Figure 4-1 Block diagram of fuzzy control system

4.1.2 半主动悬架模糊控制器设计

模糊控制系统中的关键组成部分是模糊控制器，其常见形式主要有 Mamdani 型和 T-S 型两种。其中，Mamdani 型适用于非线性系统，而针对部分非线性的系统或需要分段控制的场景时，T-S 型则更为适用。本文聚焦于 Mamdani 型控制器的设计流程进行详细阐述，该控制器结构主要由三个核心模块构成。通过对这些模块的深入剖析，我们能够更精准地理解其工作原理，进而为实际应用中的优化和改进奠定基础。因此，对于模糊控制系统的设计和研究来说，了解并掌握 Mamdani 型控制器的设计流程至关重要^[53]。如图 4-2 所示为该控制器的模块组成图。

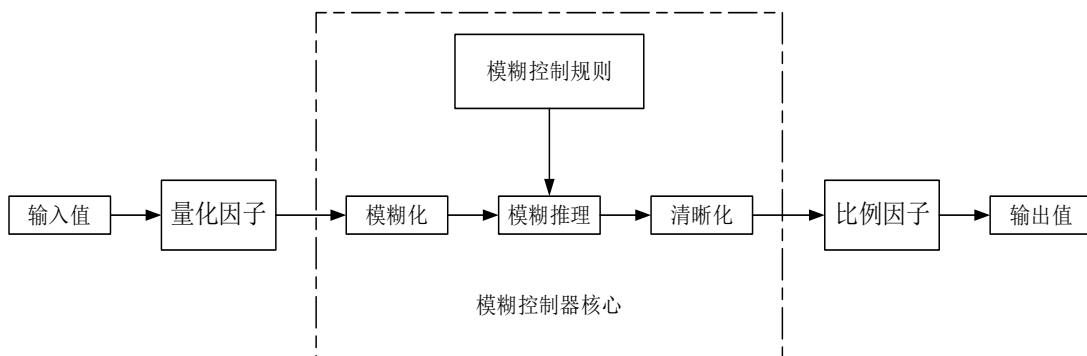


图 4-2 模糊控制器组成图

Figure 4-2 Composition diagram of fuzzy controller

(1) 量化因子和比例因子

量化因子的主要作用是将输入值的实际物理范围映射到预先设定的模糊输

入论域中，而比例因子则负责将模糊输出论域中的值转换回实际输出的物理范围。通过这两个因子，我们能够将实际的物理信号与模糊控制系统中的论域进行有效地转换，从而实现对系统的精确控制。对于汽车悬架系统而言，车身垂直加速度很大程度上决定了操纵稳定性与乘坐舒适性，因而模糊控制器的输入变量分别选取车身垂直速度与加速度，记为 e ， e_c ；输出变量记为 u ，即半主动悬架的主动控制力。其中输入变量 e 、 e_c 和输出变量 u 的模糊论域均为 $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$ ；参考悬架控制系统性能参数的实际变化区间，经过反复调试，确定量化因子 $Ke=7.5$ ， $Ke_c=0.75$ ，比例因子 $Ku=200$ 。

(2)模糊化模块

模糊化是一个将控制器接收的精确数值转换为模糊逻辑可处理的模糊数值的过程。在这个过程中，选取恰当的模糊子集和隶属函数至关重要。模糊子集的选择通常依赖于实际经验和系统特性，其数量应避免过于庞大，因为过多的模糊子集会导致控制规则的增多，进而使编辑模糊规则的工作变得复杂和冗长。在实际工程应用中，模糊子集的个数通常控制在 3 到 10 个之间。本文输入输出变量的模糊子集设定为 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ 。隶属函数的类型有广义钟形、三角型、sigmf 型和高斯型等，它们的选择应根据具体应用场景和需求来确定^[54]。由于三角形隶属度函数性能良好并且计算简单，因此选取其作为隶属度函数。如图 4-3 所示。

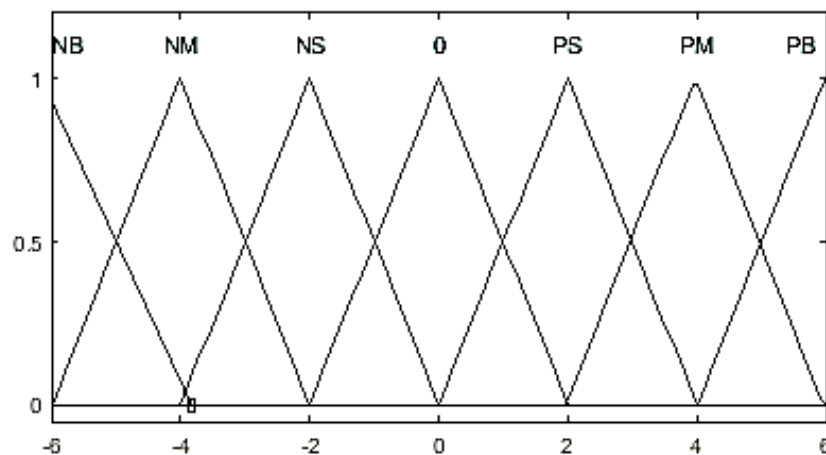


图 4-3 隶属度函数曲线

Figure 4-3 Curve of membership function

(3)模糊控制规则

设定模糊控制规则是实现模糊推理的必要步骤。这些控制规则的制定主要

基于两种途径：一种是依据操作人员长期积累的工程经验或专家对系统理论知识的研究；另一种则是基于对被控系统的试验研究，分析系统输入与输出数据的特征与关联，进而制定出具有针对性的控制规则。这两种方式都是制定模糊控制规则的重要方法，它们为模糊控制器的设计和实现提供了有力的支持。此模糊控制器根据输入变量的模糊子集、悬架系统特性和专家经验，构成了代表输出变量模糊规则如表 4-1 所示。

表 4-1 模糊控制规则表

Table 4-1 Table of fuzzy control rules

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PS	ZE	ZE
NM	PM	PM	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PM	PM	PS	PS	PS	ZE	NS
ZE	PS	PM	PS	ZE	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	ZE	PS	NS	NS	NM	NM	NS
PB	NS	NS	NM	NM	NM	NB	NB

(3)清晰化模块

清晰化也称为模糊判决，是从输出隶属度函数中找出输出精确值，常用方法主要有三种，分别是重心法、平均法和最大隶属度法。在这三者中，重心法展现出了明显的优势。相较于其他模糊方法，它不仅能够提供更平滑的输出结果，确保控制系统的稳定性和准确性，而且模糊推理的速度也更快，有助于提升系统的响应效率。因此采用重心法进行模糊判决。控制器的输入输出变量的关系曲面图如图 4-4 所示。

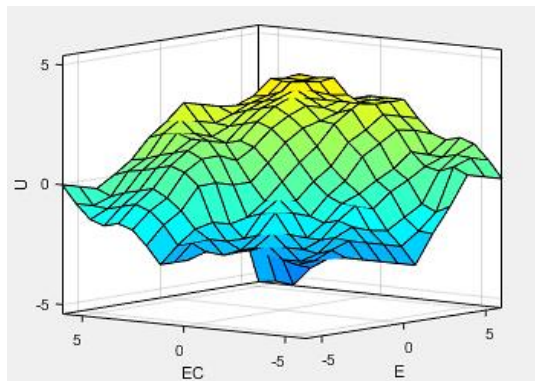


图 4-4 输入输出变量关系曲面图

Figure 4-4 Surface diagram of input and output variable relationship

基于上述设计的模糊控制器，搭建半主动悬架模糊控制系统，如图 4-5 所示。

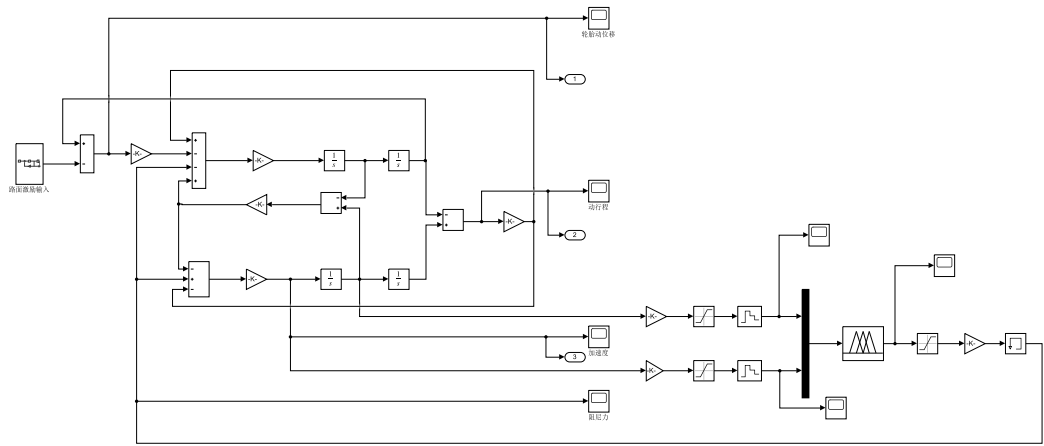


图 4-5 半主动悬架模糊控制系统仿真模型

Figure 4-5 Simulation model of fuzzy control system for semi-active suspension

4.2 基于遗传算法优化的半主动悬架模糊 PID 控制

4.2.1 遗传算法的基本原理

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)灵感源于生物的进化规律。它以高精度的计算、快速的收敛速度、高可靠性和易于实施等特点著称。是由 J.Holland 教授在上世纪七十年代中期提出的。遗传算法的核心由三个基本算子构成，即选择、交叉和变异，它们共同协作，实现了对问题的有效搜索和优化^[55]。其基本术语及其具体含义见表 4-2。

表 4-2 常见基本术语及其具体含义

Table 4-2 Common basic terms and their specific meanings

概念	具体含义
个体	遗传算法的基本对象
适应度	个体对环境的适应程度
染色体	基因组成的串
种群大小	种群中个体的数目

遗传算法将实际问题中可能存在的最优参数解视为一种“染色体”，并通过模拟生物进化过程中的自然选择和遗传机制来搜索这些最优解。这个过程涉及到编码、初始化种群、计算适应度、选择、交叉和变异等操作^[56]。遗传算法基本操作流程如图 4-6 所示：

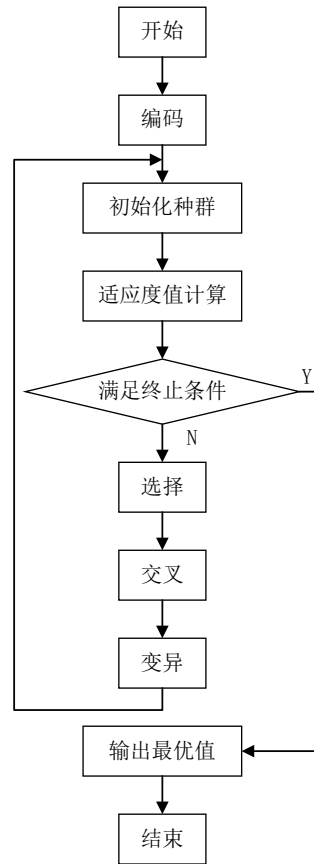


图 4-6 遗传算法的基本操作流程

Figure 4-6 Basic Operation Flow of Genetic Algorithm

(1) 编码

编码操作是将问题的可行解从其解空间转换到所能处理的搜索空间的转换方法，是遗传算法中的第一个关键步骤。编码方式的选择会直接影响到算法的搜索效率和精度，常见的编码方式有排列编码、格雷码编码等，具体选择根据问题的特性和需求来选择，以便更有效地解决复杂的优化问题。通过适当的编码操作，我们可以将问题的解空间与算法的染色体空间建立起映射关系，从而为后续的遗传操作提供基础。

(2) 初始种群

初始种群是从染色体解空间中选取的。在确定种群大小时，需考虑实际问题的特性和需求。若种群规模较小，虽然能加快遗传算法的运算速度，但可能牺牲种群的多样性，从而减弱全局搜索能力。相反，若种群规模过大，虽然可能增强全局搜索能力，但会导致算法运行效率降低。因此，为了平衡算法效率和全局搜索能力，我们需要合理选择和设定初始种群大小。

（3） 适应度值评估

目标函数的适应度值是衡量实际问题中潜在最优参数解空间中的每个个体对环境适应程度的指标，当适应度函数值较小时，意味着该个体具有相对较高的适应能力，因此在遗传过程中更容易生存下来^[57]；反之，若适应度函数值较大，则表明该个体的综合性能相对较差，更有可能在遗传过程中被淘汰。简而言之，适应度函数值的高低直接决定了个体在遗传算法中的生存能力和竞争力。

（4） 选择

遗传算法中的选择操作是确定哪些个体将被选中参与后续的交叉和变异过程，以及这些个体将产生多少个子代个体，这个操作主要基于个体的适应度值。常见选择操作包括竞赛选择、轮盘赌选择等，具体方式需要综合考虑算法的收敛速度、求解质量以及求解问题的特性等因素。

（5） 交叉

交叉操作涉及将两个的染色体按照特定方式进行基因交换，从而生成全新的个体。这一操作能够加速整个遗传算法的全局搜索进程，是确保算法找到最优解的重要环节。通过交叉操作，算法能够探索更多潜在的解空间，提高搜索的多样性和效率。

（6） 变异

替换染色体上的某些基因的过程称为变异操作。这一操作旨在增加种群的多样性，使算法能够更广泛地探索解空间。变异操作还能加速种群向实际问题可能的最优参数解的收敛速度。通过变异操作，算法能够跳出局部最优。

4.2.2 模糊 PID 控制的基本原理

模糊 PID 控制原理结合了模糊逻辑与 PID 控制算法，旨在提高控制系统的鲁棒性和自适应性，以应对复杂和不确定的环境。其核心思想在于利用模糊逻辑来动态调整 PID 控制器的参数^[58]。具体来说，首先确认能够反映系统当前状态与期望状态之前差异的被控系统偏差 e 及其变化率 e_c 并将其作为控制器的输入变量，然后通过模糊推理对 PID 控制器的三个参数进行整定，再经过 PID 控制器计算出控制量对被控系统进行调节^[59]。其原理图如图 4-7 所示。

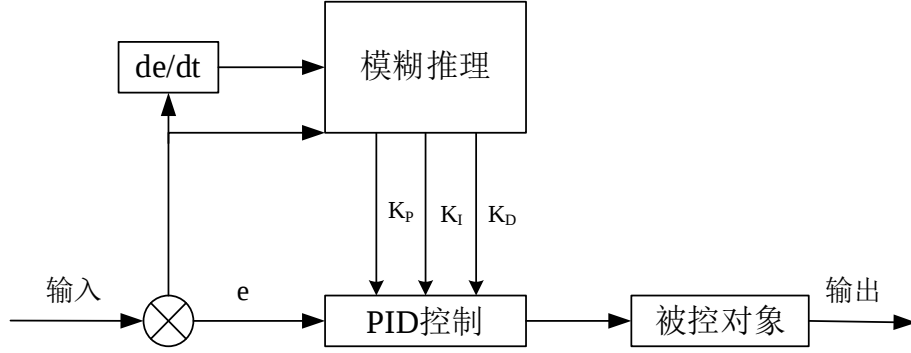


图 4-7 模糊 PID 控制器原理图

Figure 4-7 Schematic diagram of fuzzy PID controller

经过模糊 PID 控制器整定后的 PID 参数值为:

$$\begin{cases} K_P = K_{P0} + c_1 * \Delta K_P \\ K_I = K_{I0} + c_2 * \Delta K_I \\ K_D = K_{D0} + c_3 * \Delta K_D \end{cases} \quad (4-1)$$

式中, K_{P0} 、 K_{I0} 、 K_{D0} 为 PID 控制器的初始参数, ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D 为模糊控制器实时整定的输出给 PID 控制器的系数, c_1 、 c_2 、 c_3 为 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D 的比例因子, K_P 、 K_I 、 K_D 为最终输出值。

4.2.3 半主动悬架模糊 PID 控制系统设计

根据设计模糊控制器的相关经验, 控制器输入变量 e 、 e_c 和输出变量 K_P 、 K_I 、 K_D 的模糊论域都选为 $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$, 模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ 。根据悬架系统特性与专家经验, 制定 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D 的模糊控制规则如表 4-3、4-4 和 4-5 所示。

表 4-3 ΔK_p 的模糊控制规则表Table 4-3 Table of fuzzy control rules for ΔK_p

		e_c						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e	NB	PB	PB	PB	PM	PM	PS	PS
	NM	PS	ZE	PS	PS	ZE	NS	NS
	NS	NB	NB	NB	PS	ZE	PM	NS
	ZE	NM	NM	NB	NS	ZE	PS	PM
	PS	NM	NS	NS	ZE	PS	PB	PB
	PM	NM	NS	NS	ZE	PS	PB	PB
	PB	PS	PS	ZE	ZE	PM	PB	PB

表 4-4 ΔK_I 的模糊控制规则表Table 4-4 Table of fuzzy control rules for ΔK_I

		e_c						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e	NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZE
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NM
	ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	NS	NM
	PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NB	NB
	PB	ZE	NS	NM	NM	NM	NB	NB

表 4-5 ΔK_D 的模糊控制规则表Table 4-5 Table of fuzzy control rules for ΔK_D

		e_c						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NB	NM	NM	NM	NS
	NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
	NS	NM	NM	NM	NS	NS	ZE	NS
	ZE	NM	NM	NS	NS	ZE	ZE	NS
	PS	NS	ZE	ZE	PS	PS	ZE	NS
	PM	ZE	ZE	PS	PS	PS	ZE	PS
	PB	ZE	ZE	ZE	PS	PS	ZE	ZE

在 MATLAB 的模糊工具箱中, 执行“View-Rules”菜单选项打开模糊规则观察器, 如图 4-8 所示, 可以直观地查看系统输入变量之间的关系以及它们如何影响输出或观察结果, 有助于评估系统状态、识别行为模式或对检测异常情况

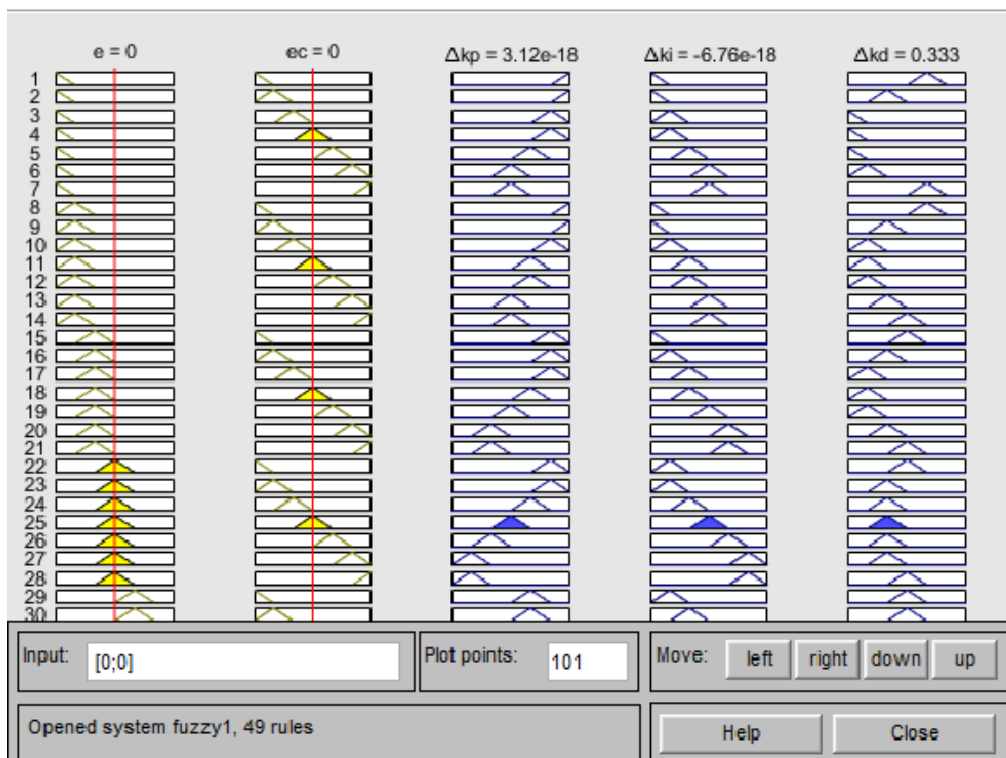


图 4-8 二维模糊规则观察器

Figure 4-8 Two-dimensional fuzzy rule observer

执行“View Surface”菜单选项打开模糊规则三维图，如图 4-9 所示，可以处理多维空间中的模糊性和不确定性，并通过曲面模型直观地展示系统输入与输出之间的关系，为优化模糊规则提供有力的支持。

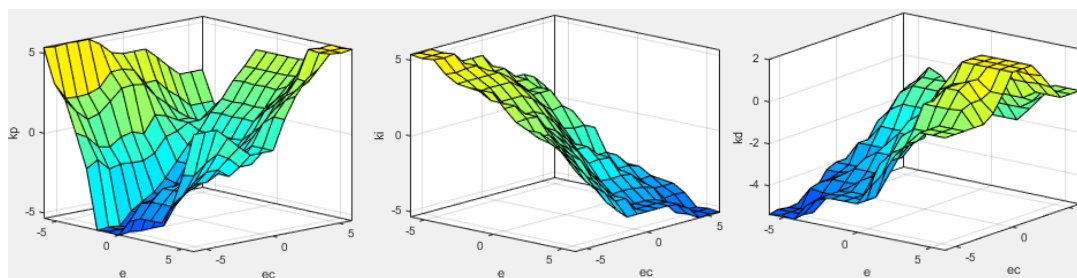


图 4-9 模糊规则三维图

Figure 4-9 Three-dimensional diagram of fuzzy rules

在 MATLAB/Simulink 的环境下搭建的四分之一主动悬架模糊 PID 控制系统。如图 4-10 所示。

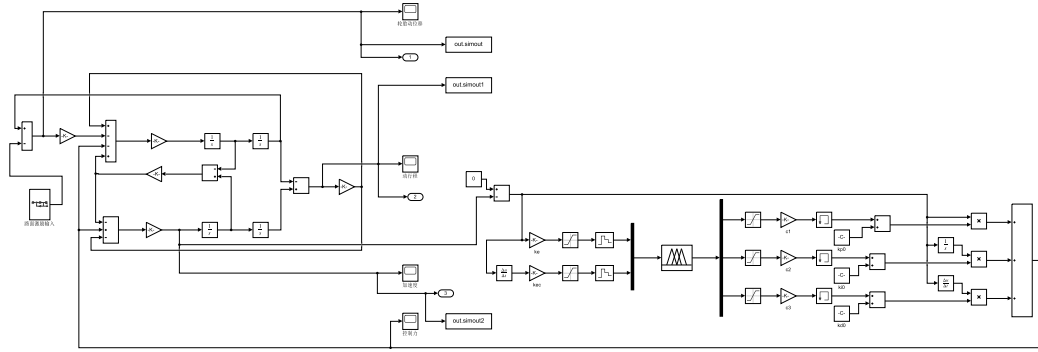


图 4-10 半主动悬架模糊 PID 控制系统仿真模型

Figure 4-10 Simulation model of fuzzy PID control system for semi-active suspension

4.2.4 基于遗传算法的模糊 PID 控制器参数优化

量化因子 K_e 、 K_{ec} 和比例因子 c_1 、 c_2 、 c_3 作为本文的设计变量，每个设计变量的区间范围如表 4-6 所示。

表 4-6 设计变量上下限

Table 4-6 Upper and lower limits of design variables

设计变量	下限取值	上限取值
K_e	0	1
K_{ec}	0	1
c_1	0	50
c_2	0	500
c_3	0.001	0.1

(1)染色体编码

设计变量的编码串 $x = (K_e, K_{ec}, c_1, c_2, c_3)$ ，编码串中每一个种群个体都是可行解，种群规模设定为 200。

(2)选择、交叉和变异操作

本文设定的选择操作概率为 0.85。交叉操作概率设定为 0.7。变异操作概率设定为 0.03。

(3)终止条件

遗传算法可以通过多种方式终止其运行过程，其中最大迭代次数是最常用的方法。除此之外，设定的最小适应度函数值也可以作为判断算法是否应终止的依据。在本文中，我们选择了最大迭代次数作为优化过程的一个终止条件。一旦算法运行达到设定的迭代次数(本文中为 60 次)，程序将自动停止，并输出

当前找到的最优解。这样的设置有助于确保算法在合理的时间内完成搜索。

调用图 4-10 的模型，输出的悬架性能评价指标的均方根值传递给遗传算法主程序。整个优化程序的流程如图 4-11 所示。迭代终止后，得到的适应度值变化曲线如图 4-12 所示。

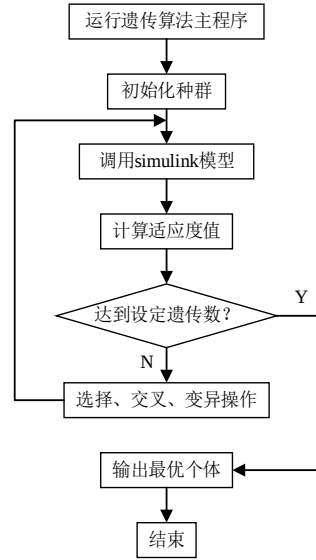


图 4-11 遗传优化流程图

Figure 4-11 Genetic optimization flow chart

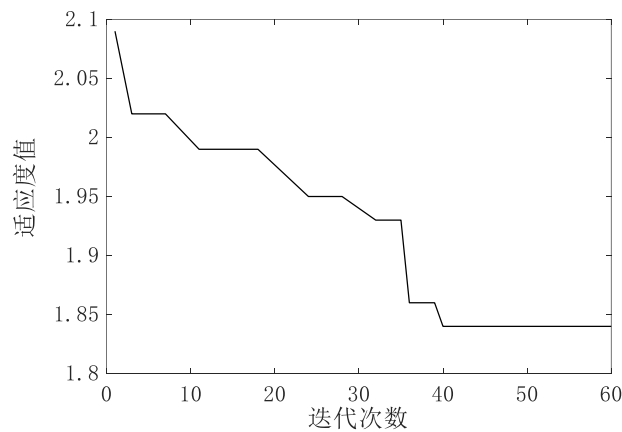


图 4-12 适应度值变化曲线

Figure 4-12 Variation curve of fitness value

由图4-12适应度值变化曲线可以看出：目标函数的适应度值不断减小。最终对应的最优个体为： $(K_e, K_{ec}, c_1, c_2, c_3) = (0.23, 0.023, 35.3295, 346.1238, 0.002)$ 。

4.3 仿真结果对比与分析

4.3.1 正弦路面输入下仿真结果及分析

采用固定步长的 ode4 方法进行数值计算，设定采样时间为 0.005 s。运行主程序，在正弦路面输入的条件下，对比分析采用模糊控制、模糊 PID 控制和 GA-FuzzyPID 控制策略的汽车半主动悬架系统的各自性能。绘制了时域内的悬架性能评价指标对比曲线。如图 4-13、4-14 和 4-15 所示。

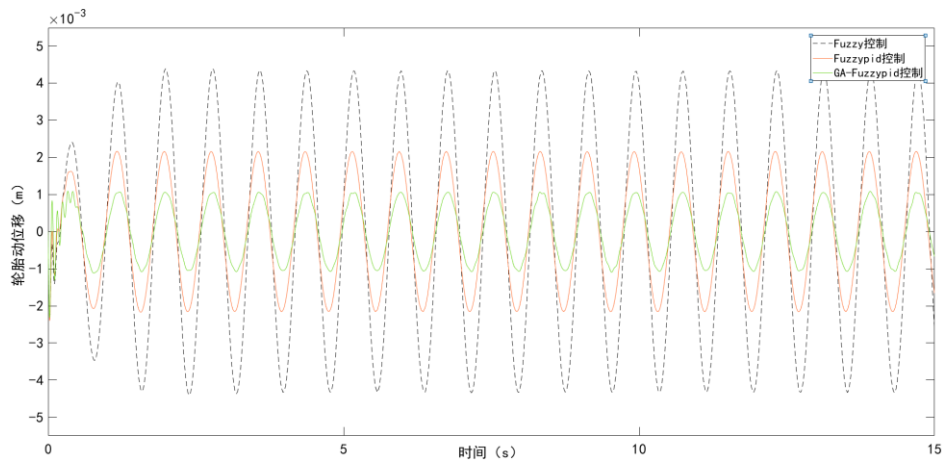


图 4-13 正弦路面轮胎动位移对比图

Figure 4-13 Comparison of dynamic tire displacement on sinusoidal pavements

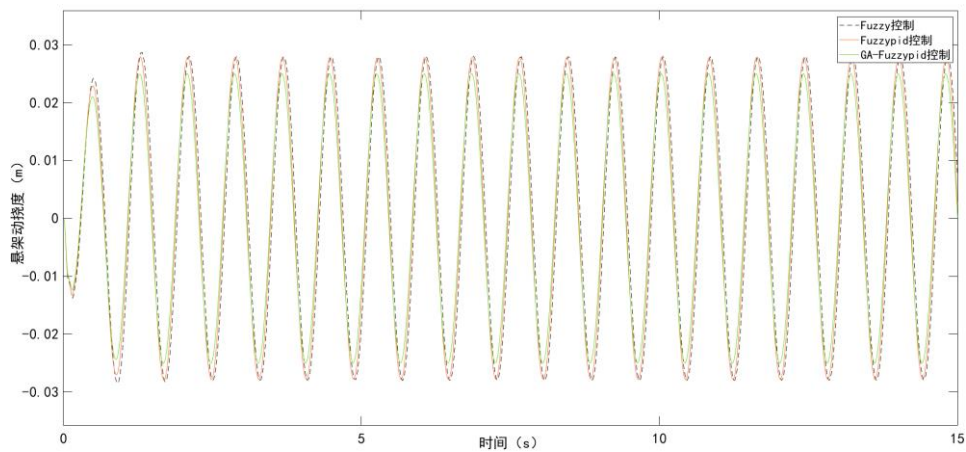


图 4-14 正弦路面悬架动挠度对比图

Figure 4-14 Comparison of dynamic deflections of sinusoidal pavement suspension

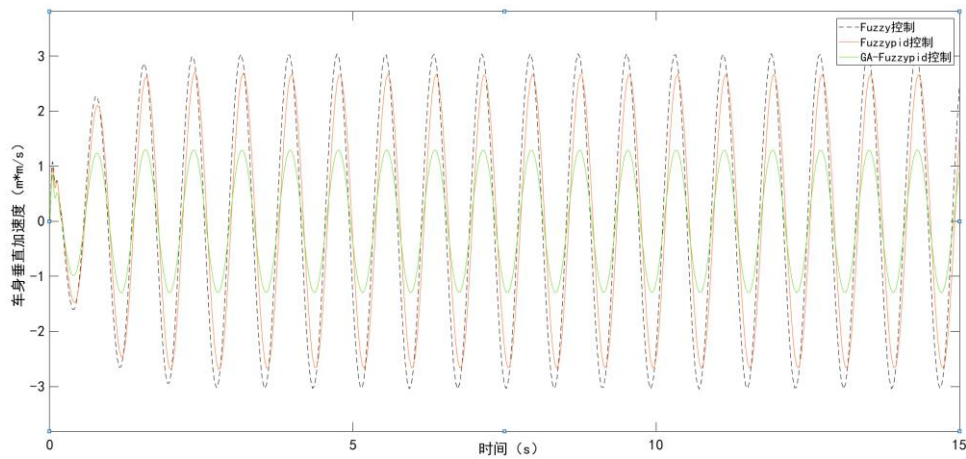


图 4-15 正弦路面车身垂直加速度对比图

Figure 4-15 Comparison of vertical acceleration of body on sinusoidal roads

通过对仿真结果进行计算分析，列出了采用不同控制策略的半主动悬架性能评价指标的均方根值对比表 4-7。

表 4-7 正弦路面输入下悬架性能评价指标的均方根值

Table 4-7 Root mean square value of suspension performance evaluation index under sinusoidal

控制策略	road input		车身垂直加速度 / (m/s ²)
	轮胎动位移/m	悬架动行程/m	
Fuzzy 控制	0.002888	0.01899	2.022
Fuzzy-PID 控制	0.001479	0.01872	1.775
GA-Fuzzypid 控制	0.000765	0.01694	0.8806

根据表 4-7 可知，与模糊控制系统相比，模糊 PID 控制系统的三个性能评价指标的均方根值分别减少了 48.8%、1.42%和 12.22%。采用基于遗传算法优化的汽车半主动悬架模糊 PID 控制系统相比较普通模糊 PID 控制系统，三个性能评价指标的均方根值分别下降了 48.28%、9.5%和 50.37%。

4.3.2 随机路面输入下仿真结果及分析

在 B 级路面输入下，对比采用模糊控制、模糊 PID 控制和基于遗传算法优化的模糊 PID 控制的半主动悬架系统的各项性能数据。绘制了时域内的悬架性能评价指标对比曲线。如图 4-16、4-17 和 4-18 所示。

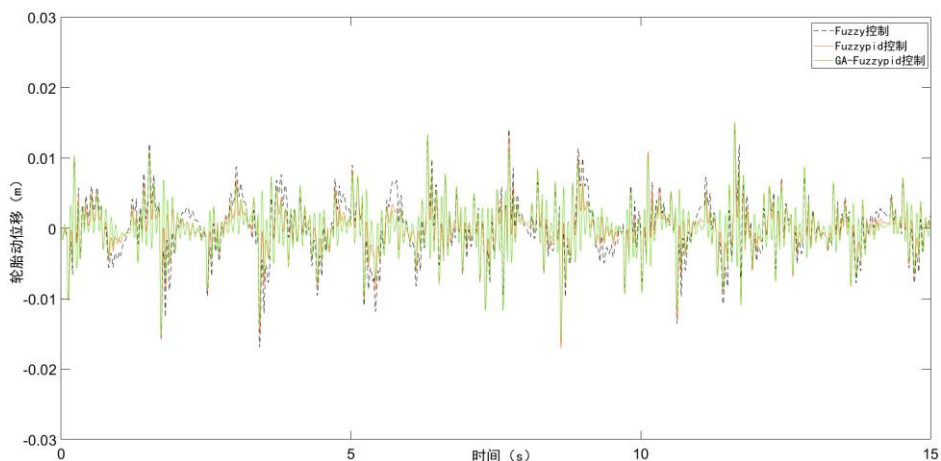


图 4-16 随机路面轮胎动位移对比图

Figure 4-16 Comparison of tire dynamic displacement on random road surface

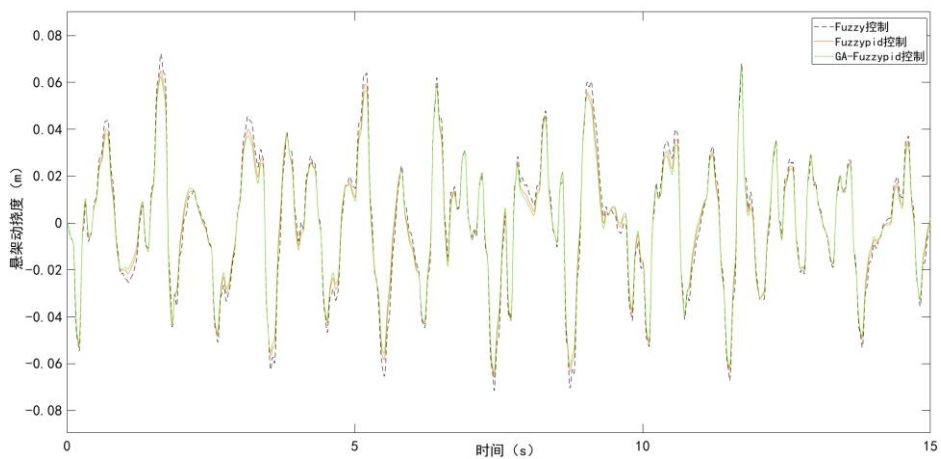


图 4-17 随机路面悬架动行程对比图

Figure 4-17 Comparison of dynamic deflection of suspension on random road surfaces

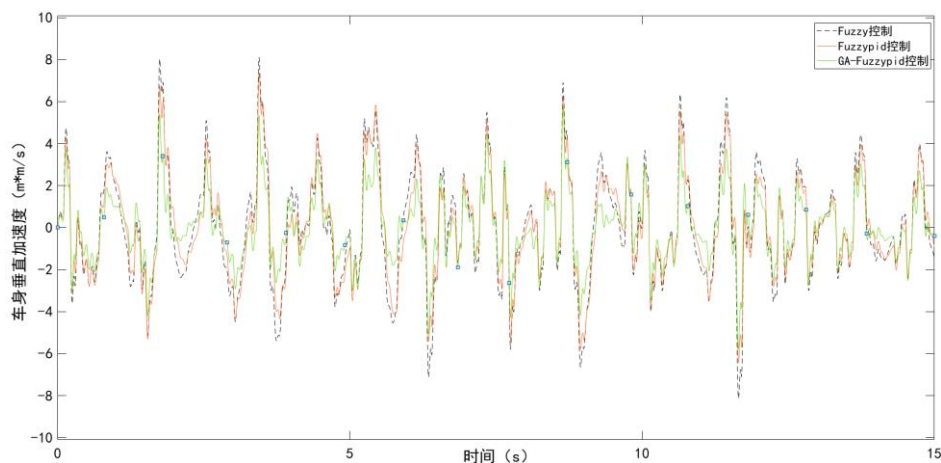


图 4-18 随机路面车身垂直加速度对比图

Figure 4-18 Comparison of vertical acceleration of vehicle body on random road surfaces

通过对仿真结果进行计算分析，列出了采用不同控制策略的半主动悬架性

能评价指标的均方根值对比表 4-8。

表 4-8 随机路面输入下悬架性能评价指标的均方根值

Table 4-8 The root mean square value of suspension performance evaluation index under random road inputs

控制策略	轮胎动位移/m	悬架动行程/m	车身垂直加速度 /(m/s ²)
Fuzzy 控制	0.004351	0.03046	2.66
Fuzzy-PID 控制	0.003657	0.02869	2.319
GA-Fuzzypid 控制	0.003489	0.02658	1.576

根据表 4-8 可知，与模糊控制系统相比，模糊 PID 控制系统的三个性能评价指标的均方根值分别减少了 15.95%、5.81%和 12.82%。采用基于遗传算法优化的汽车半主动悬架模糊 PID 控制系统相比较普通模糊 PID 控制系统，三个性能评价指标的均方根值分别下降了 4.6%、7.35%和 32.04%。

4.4 本章小结

本章首先介绍了模糊控制和遗传算法原理，分别搭建了模糊控制器和模糊 PID 控制器，并利用遗传算法整定控制器的量化因子和比例因子，相比较于其他群智能算法能够更好的在局部寻优与全局搜索之间实现平衡，数据表明两种控制方法对悬架性能均有改善，其轮胎动位移、悬架动挠度以及车身垂直加速度的均方根值都有所降低，经过遗传算法优化后的汽车半主动悬架模糊 PID 控制系统，在车辆振动抑制方面展现出比一般模糊 PID 控制和传统模糊控制更为优越的效果。

第 5 章 基于 IGWO 算法的半主动悬架 ANFIS 控制策略

5.1 ANFIS 控制基本原理

自适应神经模糊推理系统 (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System, ANFIS) 将神经网络和模糊控制的概念进行了融合。由加利福尼亚大学的 Jyh-Shing Roger Jang 教授于二十世纪九十年代首次提出的^[60]。传统的数学工具通常难以描述具有多输入多输出特性且呈现非线性系统。而 ANFIS 系统则不同, 它基于无需定量分析的 if-then 模糊推理机制, 通过运用反向传播和最小二乘法这两种方法来对参数进行灵活调整, 从而能够自动地生成规则库。这一特性使得 ANFIS 在处理复杂、非线性系统时, 展现出了更高的灵活性和适应性^{[61][62]}。

首先, 根据给定的输入和输出数据以及预设的模糊规则数, ANFIS 初始化一个模糊推理系统的结构。这包括确定输入和输出变量的范围、模糊集合的划分以及初始的模糊规则。在结构初始化之后, ANFIS 使用训练数据对系统的参数进行学习, 目的是使系统的输出能够尽可能地接近训练数据的期望输出^[63]。在参数学习的过程中, ANFIS 会根据训练数据的分布和系统的性能表现, 自动调整隶属度函数的形状和位置。这使得系统能够更好地描述输入数据的模糊性, 并提高推理的准确性。除了调整隶属度函数, ANFIS 还会对模糊规则进行优化, 通过增加、删除或修改规则, ANFIS 能够找到一组最优的规则集, 以更好地描述输入和输出之间的关系。一旦学习和训练完成, ANFIS 就可以使用学习到的隶属度函数和模糊规则进行推理。当新的输入数据进入系统时, ANFIS 会根据模糊规则对输入进行模糊化、推理和去模糊化, 最终得到输出结果^[64]。

若系统的输入变量分别为 e 和 e_c , 输出变量为 f , 一阶 T-S 模型的模糊规则为:

规则一: if x is A_1 and y is B_1 then $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

规则二: if x is A_2 and y is B_2 then $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

一阶 T-S 模型的 ANFIS 结构如图 5-1 所示。

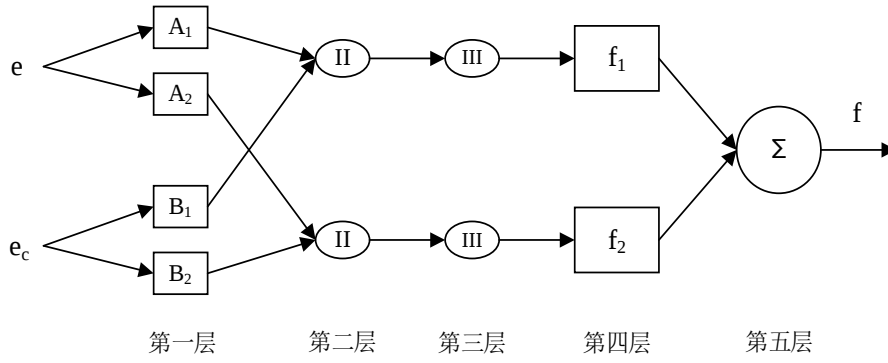


图 5-1 ANFIS 结构图

Figure 5-1 ANFIS structure diagram

第一层为模糊化层，该层运用隶属函数将输入变量转化为模糊子集，实现输入变量的模糊化，每个节点 i 均具备自适应特性且具有相应的输出函数表达式如(5-1)所示：

$$\begin{cases} O_{1,i} = u_{A_i}(e), i = 1, 2 \\ O_{1,i} = u_{B_i}(e_c), i = 1, 2 \end{cases} \quad (5-1)$$

$O_{1,i}$ 表示模糊集合的隶属度，隶属度函数 $u_A(x)$ 可以是高斯型函数、三角型函数或者钟型函数。本章采用钟型函数：

$$u_A(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}} \quad (5-2)$$

钟型函数根据前提参数 a_i 、 b_i 、 c_i 的变化而做出相应的调整。

第二层为模糊运算层，该层中的节点相固定，其输出信号是模糊化层输出函数的乘积。代表每个模糊规则的触发强度，公式如(5-3)所示：

$$O_{2,i} = u_{A_i}(e)u_{B_i}(e_c), i = 1, 2 \quad (5-3)$$

第三层为标准化层，该层的节点也是固定的。将模糊运算层所得到的每个模糊规则的触发强度进行归一化处理，计算每个规则的权重，确保所有规则在推理过程中的贡献得到合理的权衡。公式如(5-4)所示：

$$O_{3,i} = w = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1, 2 \quad (5-4)$$

第四层为计算输出层，该层根据标准化层输出的权重和规则的后件，计算出最终的输出值，公式如(5-5)所示：

$$O_{4,i} = w_i f_i = w_i(p_i x + q_i y + r_i), i = 1, 2 \quad (5-5)$$

式中, w_i 是归一化的触发强度, $\{p_i, q_i, r_i\}$ 是节点的参数集合。

第五层为去模糊化层, 该层的节点固定。对所有信号进行线性相加得到信号总和, 即实际输出, 公式如(5-6)所示:

$$O_{5,i} = \sum w_i f_i = \frac{\sum w_i f_i}{\sum w_i}, i = 1, 2 \quad (5-6)$$

5.2 基于 IGWO 算法的半主动悬架 ANFIS 控制

5.2.1 基于 IGWO 算法的 ANFIS 应用于半主动悬架的优点

ANFIS 通过结合模糊逻辑和神经网络的各自优势, 能够在处理不确定性、模糊性和非线性问题时表现出色。模糊逻辑推理虽然能够模拟人类的推理过程, 但缺乏自学习能力, 通常依赖于专家和研究人员的经验积累。而神经网络则具有强大的自学习能力, 但它在表达人类推理能力方面存在局限, 常被视为一个黑盒。ANFIS 的优势在于利用神经网络的自学习能力来弥补模糊推理系统的不足^[65]。通过这种方式, ANFIS 不仅能够在各种领域得到广泛应用, 还能够准确地表达人类的推理过程。因此, ANFIS 在解决实际问题时展现出了巨大的潜力。

IGWO 算法相比其他优化算法, 优势在于其参数简洁易设置、算法流程清晰、计算速度快且精度高, 同时具备强大的收敛能力。将其应用在半主动悬架 PID 控制参数寻优方面, 有助于提高悬架性能^[66]。但是由于汽车悬架系统是非线性系统不具备可预测性, 汽车行驶在复杂多变的路况等一系列外部干扰的情况下, 常规控制方法可能无法达到最优效果。结合 IGWO 算法和 ANFIS 控制来优化半主动悬架控制系统, 能同时拥有 IGWO 算法优化参数的准确性与快速性, 以及 ANFIS 控制的强大鲁棒性和抗干扰能力^[67]。因此, 基于 IGWO 算法的半主动悬架 ANFIS 控制相较于单一的控制策略更能适应复杂多变的路况, 从而展现出更好的控制效果。

5.2.2 基于 IGWO 算法的 ANFIS 控制的结构设计

基于 IGWO 算法的半主动悬架 ANFIS 控制方法是将 ANFIS 和 IGWO 算法二者结合, ANFIS 控制器的训练数据和检验数据来源于基于 IGWO 算法优化的半主动悬架 PID 控制系统的输入输出数据。系统控制原理框图如图 5-2 所示。

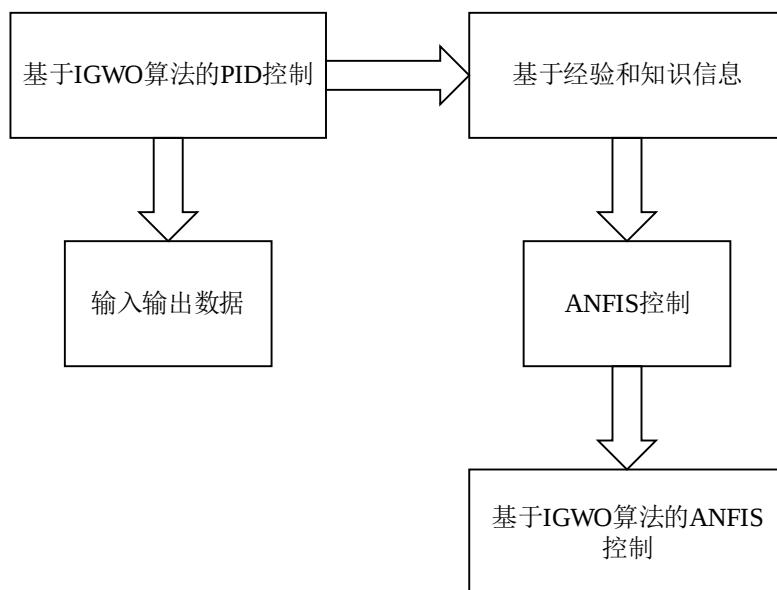


图 5-2 基于 IGWO 算法的 ANFIS 控制系统框图

Figure 5-2 The block diagram of ANFIS control system based on IGWO algorithm

同第三章，考虑汽车行驶舒适性和安全性，选取式(3-19)和(3-20)作为目标函数及约束条件。

基于 IGWO 算法的 ANFIS 控制器设计的过程由以下几个步骤组成：

1、运行本文第三章所设计的基于 IGWO 算法优化的半主动悬架 PID 控制系统，所得到的输入输出数据即是 ANFIS 控制器的训练数据和检验数据。

2、根据输入变量与输出变量的对应关系，对输入输出数据集进行采样并存入 MATLAB 中的 workspace 当中。打开 ANFIS 工具箱，在 Neuro-Fuzzy Designer 中装载存放于 workspace 中的训练数据与检验数据。

3、综合考虑悬架特性与前文模糊控制器的设计经验，在 ANFIS 工具箱中编辑隶属函数和模糊规则，生成初始结构文件。所设计的输入隶属函数如图 5-3 所示。

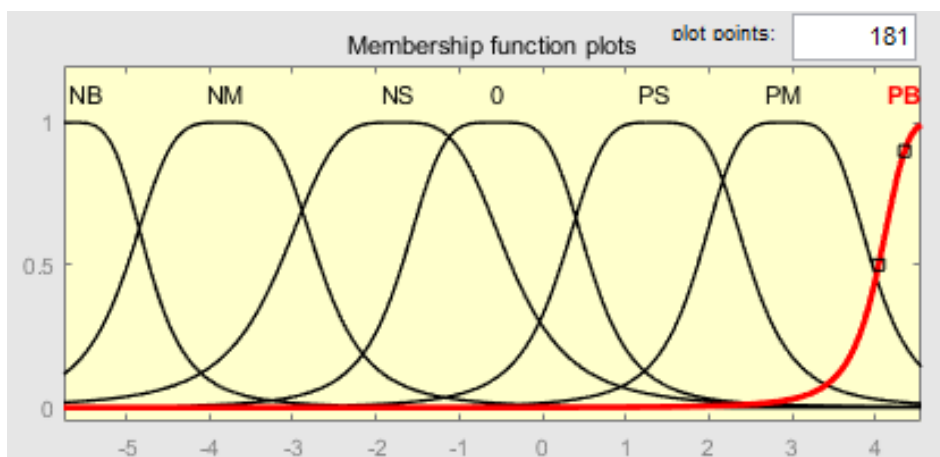


图 5-3 ANFIS 工具箱输入隶属度函数

Figure 5-3 ANFIS toolbox input membership function

所设计的 ANFIS 结构，如图 5-4 所示。

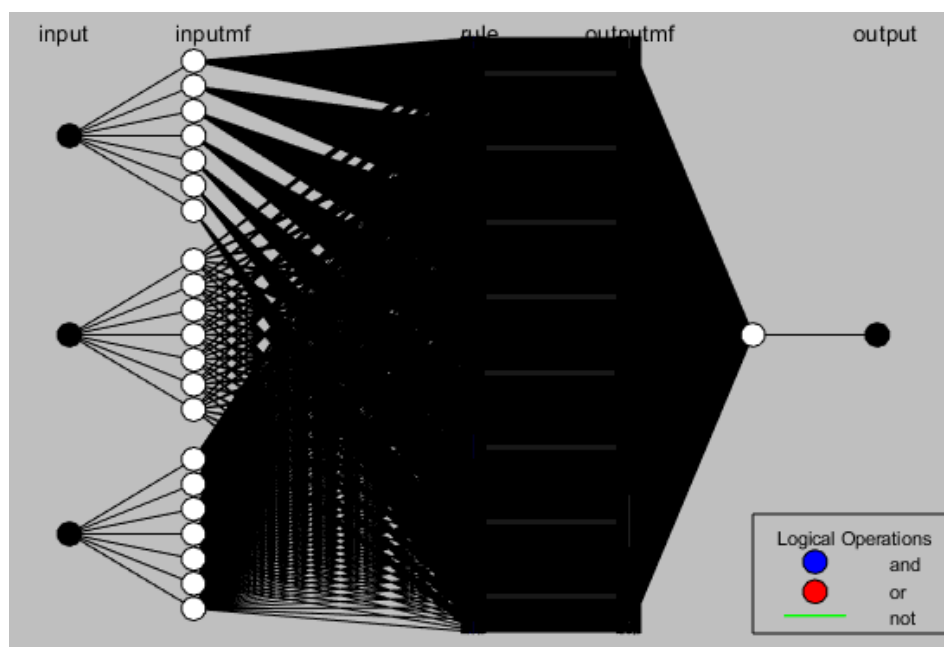


图 5-4 ANFIS 结构

Figure 5-4 ANFIS structure

4、确定训练次数为 200、停止误差为 0.01、参数调整策略采用 hybrid 法，对数据进行训练，如图 5-5 所示。

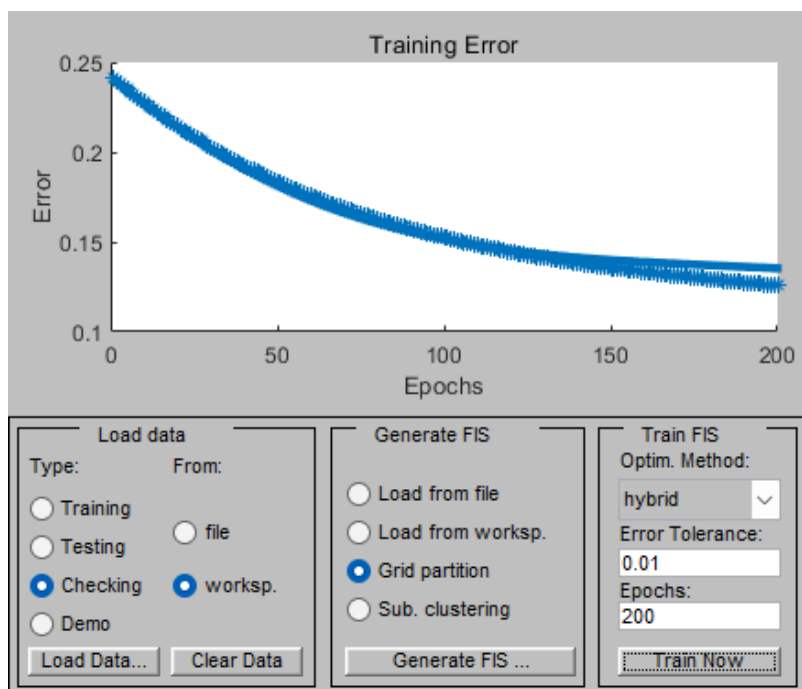


图 5-5 ANFIS 数据训练图

Figure 5-5 ANFIS data training diagram

5、训练数据实际与预测对比图如图 5-6 所示。

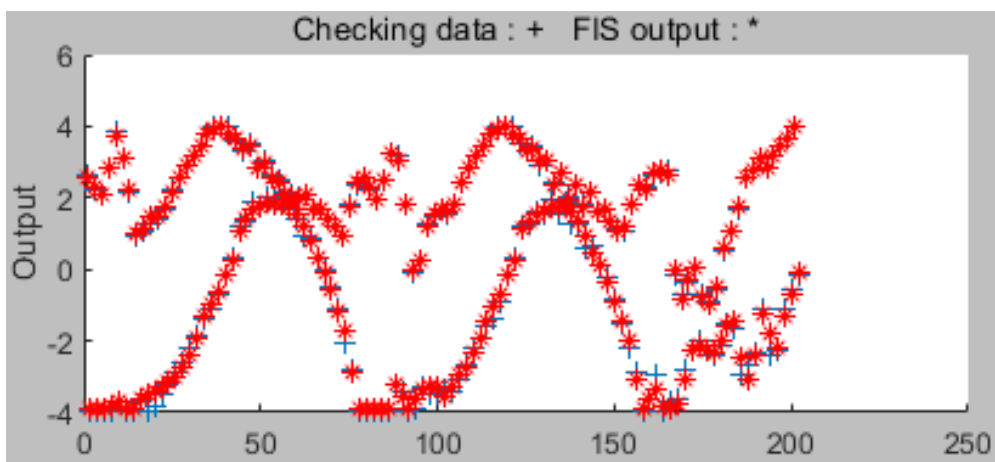


图 5-6 训练数据实际与预测对比

Figure 5-6 Comparison of actual and predicted training data

5.3 仿真结果对比与分析

本节所设计的 ANFIS 为三输入单输出系统，输入输出隶属函数共四个，选用钟型函数作为隶属函数。将训练后的 ANFIS 控制系统导入到模糊控制器中，运行仿真模型。

5.3.1 正弦路面输入下仿真结果及分析

为确保数据的精确性采用固定步长的 ode4 方法进行数值计算，设定采样时间为 0.005 s。运行主程序，在正弦路面输入的条件下，对比分析采用 IGWO-PID控制、GA-Fuzzypid控制和 ANFIS控制策略的汽车半主动悬架系统的各自性能。绘制了时域内的悬架性能评价指标对比曲线。如图 5-7、5-8 和 5-9 所示。

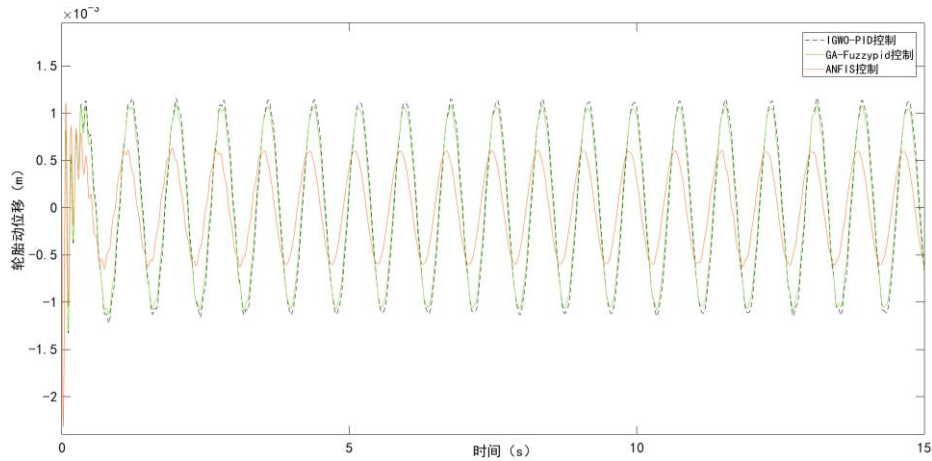


图 5-7 正弦路面轮胎动位移对比图

Figure 5-7 Comparison of dynamic tire displacement on sinusoidal pavements

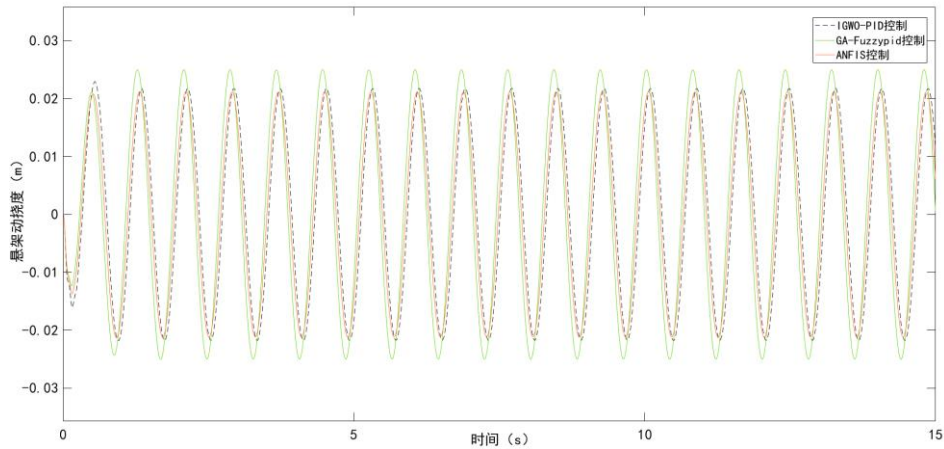


图 5-8 正弦路面悬架动挠度对比图

Figure 5-8 Comparison of dynamic deflections of sinusoidal pavement suspension

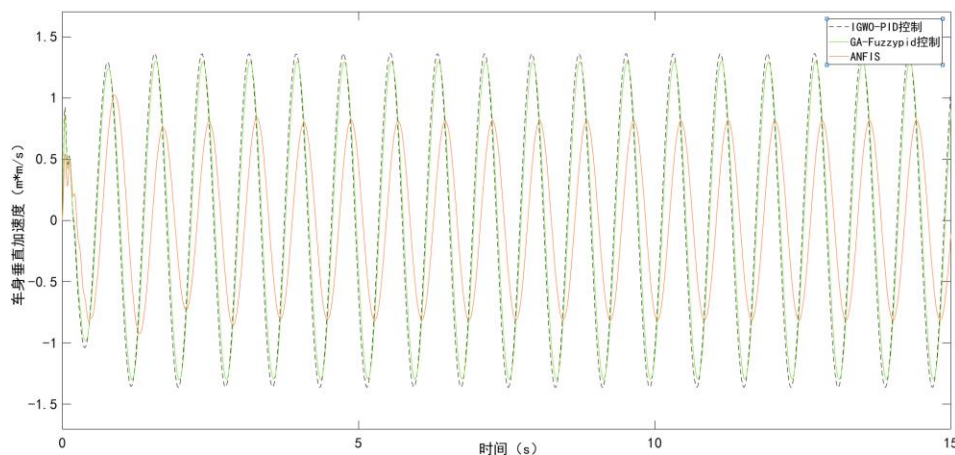


图 5-9 正弦路面车身垂直加速度对比图

Figure 5-9 Comparison of vertical acceleration of body on sinusoidal roads

通过对仿真结果进行计算分析，列出了采用不同控制策略的半主动悬架性能评价指标的均方根值对比表 5-1。

表 5-1 正弦路面输入下悬架性能评价指标的均方根值

Table 5-1 Root mean square value of suspension performance evaluation index under sinusoidal

控制策略	road input		车身垂直加速度 /(m/s^2)
	轮胎动位移/m	悬架动行程/m	
IGWO-PID 控制	0.000842	0.01560	0.9311
GA-Fuzzypid 控制	0.000765	0.01694	0.8806
ANFIS 控制	0.000483	0.001436	0.5634

根据表 5-1 可知，与 IGWO-PID 控制系统相比，ANFIS 控制系统的三个性能评价指标的均方根值分别减少了 48.8%、1.42%和 12.22%。对比 GA-Fuzzypid 控制系统，ANFIS 控制系统的三个性能评价指标的均方根值分别减少了 36.86%、15.23%和 36.02%。

5.3.2 随机路面输入下仿真结果及分析

在 B 级路面输入下，对比采用 IGWO-PID 控制、IGWO-PID 控制和 ANFIS 控制策略的汽车半主动悬架系统的各项性能数据。绘制了时域内的悬架性能评价指标对比曲线。如图 5-10、5-11 和 5-12 所示。

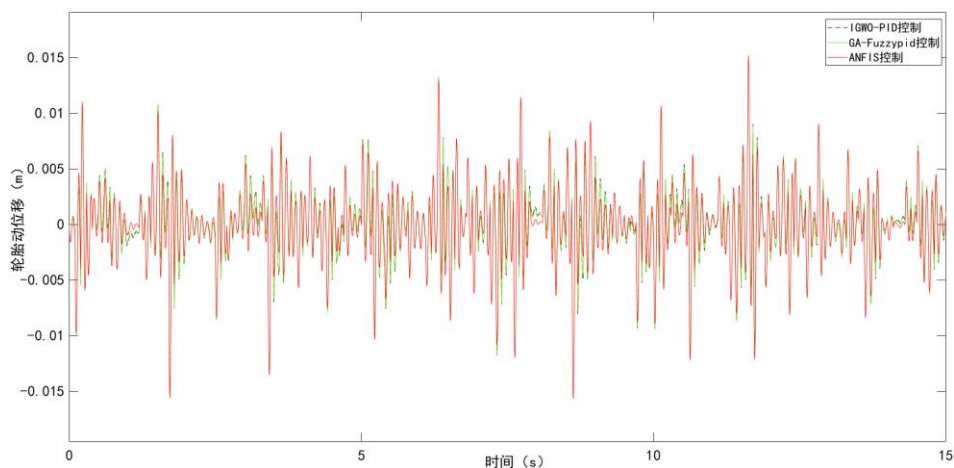


图 5-10 随机路面轮胎动位移对比图

Figure 5-10 Comparison of tire dynamic displacement on random road surface

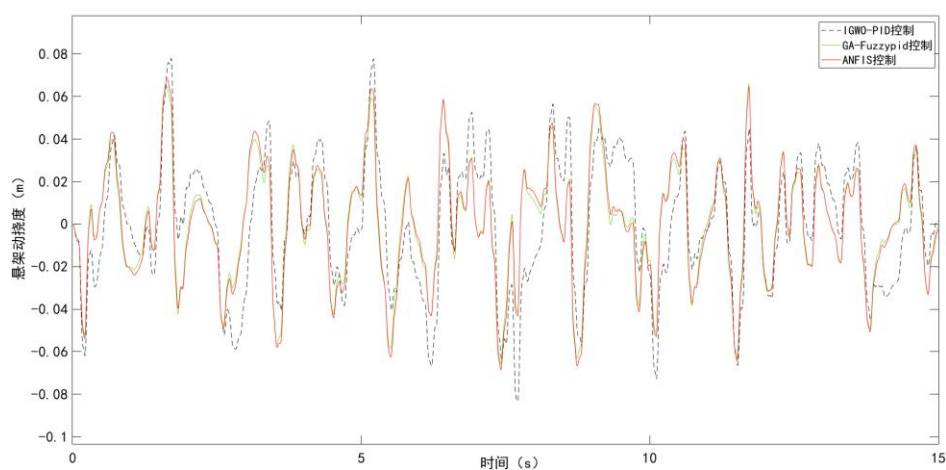


图 5-11 随机路面悬架动挠度对比图

Figure 5-11 Comparison of dynamic deflection of suspension on random road surfaces

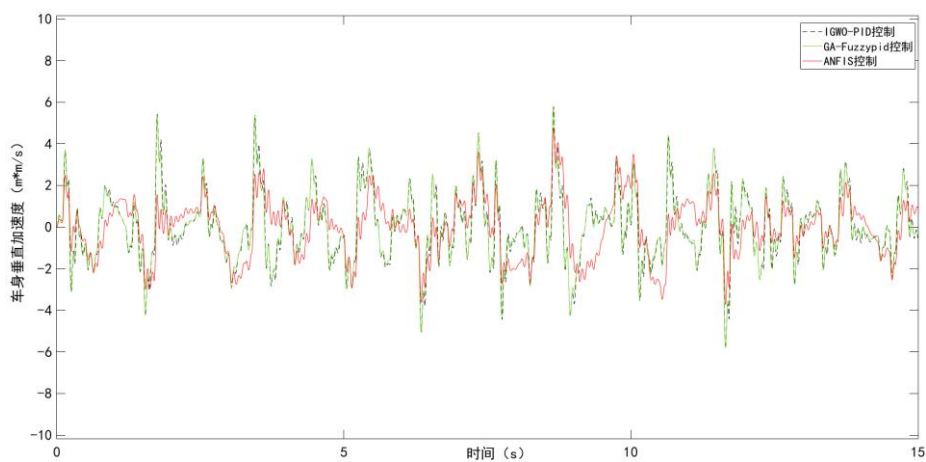


图 5-12 随机路面车身垂直加速度对比图

Figure 5-12 Comparison of vertical acceleration of vehicle body on random road surfaces

通过对仿真结果进行计算分析，列出了采用不同控制策略的半主动悬架性能评价指标的均方根值对比表 5-2。

表 5-2 随机路面输入下悬架性能评价指标的均方根值

Table 5-2 The root mean square value of suspension performance evaluation index under random

控制策略	road inputs		
	轮胎动位移/m	悬架动行程/m	车身垂直加速度 /(m/s ²)
IGWO-PID 控制	0.003516	0.02990	1.643
GA-Fuzzypid 控制	0.003489	0.02658	1.576
ANFIS 控制	0.003410	0.02789	1.431

根据表 5-2 可知，与 IGWO-PID 控制系统相比，ANFIS 控制系统的三个性能评价指标的均方根值分别减少了 3%、6.7%和 12.9%。ANFIS 控制的半主动悬架的轮胎动位移和车身垂直加速度的均方根值分别降低了 2.26%、9.2%。悬架动行程的均方根值上升了 4.93%，此项性能略有恶化，但整体性能有所提升。

5.4 本章小结

首先介绍了 ANFIS 的基本原理，说明了基于 IGWO 算法的 ANFIS 的应用于半主动悬架中的优势，然后设计了 ANFIS 控制系统并应用于汽车悬架控制。在不同路面激励输入下，对比基于 IGWO-PID 和 GA-Fuzzypid 控制策略在悬架系统性能方面的表现，仿真表明在正弦路面下三个性能评价指标的均方根值均有所下降，在随机路面下悬架动挠度的均方根值略有上升，但整体性能有所提升。得出基于 IGWO 算法的 ANFIS 控制具有良好自适应能力，进一步提升了汽车悬架的性能指标。

第 6 章 总结与展望

6.1 全文内容总结

本文聚焦于汽车半主动悬架系统设计中控制策略这一关键问题进行研究，以二自由度四分之一悬架系统为对象，基于 PID 控制、模糊控制、模糊 PID 控制以及 ANIFS 控制方法，通过融合群体智能优化算法，对控制参数进行优化。并利用 MATLAB 软件搭建了仿真模型，经过验证，表明所提出的控制策略优化了悬架系统的整体性能。本文主要工作如下：

(1) 在 Simulink 环境下搭建了四分之一半主动悬架仿真模型；介绍了正弦形式路面、路面不平度功率谱以及道路不平度的分级标准，建立了正弦型路面和 B 级随机路面仿真模型作为半主动悬架系统的激励输入；根据控制目地制定了相应的悬架性能评价指标。

(2) 搭建了基于 PID 控制的半主动悬架系统。针对标准灰狼算法的初始化方法、搜索机制以及选择策略进行了创新的改进，提出了 IGWO 算法。设计了权衡悬架性能的评价指标的目标函数和约束函数。数据表明相较于标准 GWO 算法，IGWO 算法在整定 PID 参数时展现出更高的求解精度，在半主动悬架 PID 控制方面效果更佳。

(3) 分别搭建了模糊控制器和模糊 PID 控制器，并利用遗传算法整定控制器的量化因子和比例因子，相较于其他群体智能优化算法能够更好的在局部寻优与全局搜索之间实现平衡，并且基于遗传算法的半主动悬架模糊 PID 控制在面对非线性系统和复杂被控对象时具有良好的自适应能力，数据表明优化效果明显好于普通模糊 PID 控制。

(4) 利用 MATLAB 中的 ANFIS 工具箱设计了 ANFIS 控制器，其训练数据和检验数据来源于基于 IGWO 算法优化的半主动悬架 PID 控制系统的输入输出数据。数据表明：基于 IGWO 算法的 ANFIS 控制具有自适应能力和抗干扰性的特点，进一步提升了汽车悬架的整体性能指标。

6.2 研究展望

在研究过程中，虽然提出的控制策略在一定程度上提升了悬架的整体性能，但受限于个人学识与实际条件，存在以下不足之处：

(1)本文的研究仅聚焦于悬架系统，尚未深入探讨其与其他系统间的动态交互关系。此外，本文所使用的路面模型仅为正弦形式和 B 级随机形式。路面种类较为单一，应进一步增加试验路面的多样性。

(2)虽然四分之一悬架模型足以验证控制策略的有效性，但在实际行驶过程中，车辆会面临更多复杂的情况，这可能导致现有模型存在缺陷。此外，本文的悬架模型是一个简化版本，为了更贴近实际，应当建立七自由度整车模型。

(3)汽车底盘控制是一个极其复杂的系统，不能仅仅关注悬架的振动特性。为了进一步完善本文的研究，可以考虑将油门、转角、制动等其他信号纳入考虑范围。并通过利用 CAN 总线技术实现多系统集成控制，提高整体可靠性。

参考文献

- [1] 郭孔辉.汽车操纵动力学原理[M].南京:江苏科学技术出版社,2011.
- [2] 曾繁鑫,郑敏毅,刘军,綦衡敏,张农.半主动液压互联悬架客车的平顺性研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(03):309-315.
- [3] 常明.汽车底盘构造[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [4] Porumamilla H , Kelkar A G , Vogel J M.Modeling and verification of an innovative active pneumatic vibration isolation system[J].Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2008, 130(3):1750-1758.
- [5] 徐荣霞.基于磁流变阻尼器的 1/4 车辆半主动悬架系统混合控制策略研究[D].南昌:华东交通大学,2020.
- [6] 李雄兵.汽车半主动悬架系统非线性动力学特性研究[D].甘肃:兰州交通大学,2022.
- [7] 孙雪梅.可调阻尼减震器优化设计的研究[D].长春:吉林大学,2006.
- [8] 秦也辰.基于路面识别的车辆半主动悬架控制研究[D].北京:北京理工大学,2016.
- [9] Astrom K.J., Hagglund T.PID controller:theory, design and tuning [M]. Instrument Society of America, 1995.
- [10] Jeongwoo S ,Hyunah K ,Hoon S K.A review on robust control of robot manipulators for future manufacturing[J].International Journal of Precision Engineering and Manufacturing,2023,24(6):1083-1102.
- [11] LVV R G ,Chandmal R S ,VSV S , et al.Stochastic optimal preview control response of a quarter-car nonlinear suspension model using spectral decomposition method[J].Noise Vibration Worldwide,2022,53(4-5):225-232.
- [12] 葛宇超,刘刚,苗丰等.馈能磁流变半主动悬架模糊滑模控制[J].液压与气动,2022,46(09):180-188.
- [13] 胡庆玉.基于 IPSO-BP 网络的汽车半主动悬架控制算法研究[D].长春:吉林大学,2010.

- [14] 余建平,周新民,陈明.群体智能典型算法研究综述[J].计算机工程与应用,2010,46(25):1-4+74.
- [15] 王巧灵.基于群体智能混合优化算法的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [16] 赵强,何法,王鑫等.基于遗传算法优化的车辆主动悬架模糊 PID 控制[J].重庆理工大学学报(自然科学),2016,30(02):6-11.
- [17] 段慧清,王鹏,葛祥旭.基于灰狼算法的轮毂电机汽车悬架性能优化[J].汽车工程师,2023,(10):36-41.
- [18] 詹长书,陈小文.全参数自适应粒子群 LQR 主动悬架控制策略[J].重庆理工大学学报(自然科学),2023,37(12):9-17.
- [19] 荆航,续彦芳.基于改进人工蜂群算法优化的汽车主动悬架 PID 控制[J].机械制造与自动化,2023,52(05):232-235.
- [20] 吴参.车辆半主动悬架非线性特性与控制算法研究[D].杭州:浙江大学,2010.
- [21] Fan C J ,Sun M X ,Chu X Y , et al.Optimization of two-state adjustable damping shock absorber[J].Key Engineering Materials,2011,1076(464-464):332-335.
- [22] Cherry A S , Jones R P.Fuzzy logic control of an automotive suspension system [J].IEE proceedings.Control theory and applications,1995(2):142-148.
- [23] Narwade P, Deshmukh R, Nagarkar M.Modeling and simulation of a semi-active vehicle suspension system using PID controller[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 1004(1): 012003.
- [24] Mahesh P, Nagarkar, Yogesh J, et al.Ga-based multi-objective optimization of active nonlinear quarter car suspension system—pid and fuzzy logic control[J]. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 2018, 13(1):9-18.
- [25] 郭孔辉.汽车振动与载荷的统计分析及悬挂系统参数的选择[J].汽车技术,1976,(04):1-15.
- [26] 管欣,逢淑一,詹军等.汽车悬架运动学特性参数优化方法[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(01):145-148.
- [27] 喻凡,张勇超.馈能型车辆主动悬架技术[J].农业机械学报,2010,41(01):1-6.
- [28] 秦也辰,董明明,赵丰等.基于路面识别的车辆半主动悬架控制[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(08):1138-1143.

- [29] 王其东,梅雪晴.汽车半主动悬架的研究现状和发展趋势[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2013,36(11):1289-1294.
- [30] 宋崇智.基于智能算法的汽车悬架参数优化设计研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
- [31] 上官郑伟.汽车磁流变半主动悬架控制策略研究[D].北京:北京交通大学,2021.
- [32] 蒋琪奎,吴心杰.汽车悬架主参数匹配仿真分析[J].农业装备与车辆工程,2022,60(03):125-128.
- [33] 张好好.汽车半主动悬架控制策略及联合仿真研究[D].西安:长安大学,2016.
- [34] 楼少敏,王永达,许沧粟.基于路面不平度自功率谱密度函数计算国际不平度指数的研究[J].公路交通科技,2007,(08):12-15.
- [35] Liu W S ,Zhang X.Relationship between international roughness index and power spectral density of asphalt pavements in china[J].Advanced Materials Research,2013,2457(742):104-108.
- [36] Mechanical Vibration-Road Surface Profiles Reporting of Measured Data, ISO 8608: 1995(E).
- [37] 余志生. 汽车理论[M].北京:机械工业出版社,1996.
- [38] 赵永辉,马力,朱祝英等.商用车全浮式驾驶室悬置系统优化设计[J].噪声与振动控制,2007(03):83-85.
- [39] Kwac K L ,Kim G H ,Song S J , et al.Optimal design and performance evaluation of x-type magnetic spring suspension for commercial vehicle seat[J].Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers,2014,23(5):456-464.
- [40] Lelong Z ,Zhiyuan Z ,Zhenyu W.PID control of vehicle active suspension based on particle swarm optimization[J].Journal of Physics: Conference Series,2021,1748(3):2028-2036.
- [41] 韩文杰.基于观测器的 PID 控制结构研究及应用[D].北京:华北电力大学(北京),2023.
- [42] C.C. H ,K.J. A.Refine ments of the ziegler-nichols tuning formula[J].IEEE proceedings.Control theory and applications,1991,138(2):111-118.
- [43] 黄友锐,曲立国. PID 控制器参数整定与实现[M]. 北京:科学出版社,2010.

- [44] 晏福.灰狼优化算法的改进研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
- [45] 李佳园,李耀南,惠继录.灰狼优化算法的应用综述[J].数字技术与应用,2022,40(09):10-13.
- [46] 徐伟进,徐炜彬,张炜华等.基于NRS的GWO-SVM变压器故障诊断方法研究[J].电工电气,2022,(02):9-13+56.
- [47] 赵惠贤.山西省高速公路网级路面养护资金分配研究[D].南京:东南大学,2021.
- [48] 胡昊.面向高铁运行环境安全的侵限监测关键技术研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2022.
- [49] 冯良瑞.基于改进灰狼优化算法的储能双向变流器控制策略研究[D].南昌:南昌大学,2023.
- [50] Kewen L ,Shaohui L ,Zongchao H , et al.Grey wolf optimization algorithm based on cauchy-gaussian mutation and improved search strategy[J].Scientific Reports,2022,12(1):18961-18961.
- [51] Nenad M ,Matej R ,Marjan G.Optimized fuzzy logic control system for diver's automatic buoyancy control device[J].Mathematics,2022,11(1):22-22.
- [52] 梁旭东.汽车空气悬架系统平顺性分析及控制策略研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2022.
- [53] 房宏威.汽车主动悬架模糊神经控制仿真研究[D].西安:长安大学,2014.
- [54] Deepesh S.Fuzzy with adaptive membership function and deep learning model for frequency control in pv-based microgrid system[J].Soft Computing,2022,26 (19):9883-9896.
- [55] 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.
- [56] Xiujuan L ,Liu W ,Shanhong L.Optimization of suspension system using particle swarm optimisation and genetic algorithm[J].International Journal of Vehicle Structures Systems,2019,11(3):297-300.
- [57] 赵强,何法,王鑫等.基于遗传算法优化的车辆主动悬架模糊 PID 控制[J].重庆理工大学学报(自然科学),2016,30(02):6-11.
- [58] 朱玉刚,李江波,史晨路.基于 Simulink 的半主动悬架 PID 控制与 Fuzzy-PID 控制仿真[J].汽车实用技术,2020,45(18):152-155.

- [59] 曾洁如,谷正气,李伟平等.基于遗传算法的半主动悬架模糊 PID 控制研究[J]. 汽车工程,2010,32(05):429-433.
- [60] Jang J S R.Anfis: adaptive-network-based fuzzy inference system [J]. IEEE Trans on Smc, 1993, 23(3):665-685.
- [61] 侯志祥,申群太,李河清.基于ANFIS的非线性系统辨识研究[J].计算机仿真,2004,(07):119-121.
- [62] 姜康,张腾,冯忠祥.半主动磁流变阻尼器悬架的一种ANFIS-PID控制策略[J]. 组合机床与自动化加工技术,2016,(04):80-82+88.
- [63] 樊俊尧.基于智能优化算法的车辆主动悬架控制策略研究[D].镇江:江苏大学, 2018.
- [64] Singh R ,Kainthola A ,Singh T.Estimation of elastic constant of rocks using an anfis approach[J].Applied Soft Computing Journal,2011,12(1):40-45.
- [65] 荆航.基于群智能算法优化的主动悬架控制策略研究[D].西安:中北大学,2022.
- [66] 辛亮,杜子学,许舟洲.基于ANFIS-PID控制策略的主动悬架动力学性能研究[J]. 机械设计与制造,2022,(05):157-159.
- [67] Bhangal S N ,Chaudhary S.Anfis control of vehicle active suspension system[J].International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research,2018,7(4): 433-437.

攻读学位期间发表的学术成果

- [1] 顾黄一,汪石农,陈德政.基于灰狼算法的半主动悬架模糊 PID 控制研究.安徽工程大学学报.
- [2] 陈德政,顾黄一,汪石农.汽车 ABS 模糊变结构控制设计.吉首大学学报(自然科学版).

致谢

时光荏苒，岁月如梭，转眼间我的硕士生涯即将画上句号。回首这段求学的日子，我深感自己收获颇丰，这一切都离不开身边老师、同学和家人的支持与帮助。在此，我要向他们表达我最诚挚的感谢。

首先，我要感谢我的导师汪石农副教授。是您的悉心指导，让我在学术道路上不断前行。您严谨的治学态度、深厚的学术造诣和敏锐的洞察力，让我受益匪浅。在我遇到困难和挫折时，您总是给予我耐心的指导和鼓励，让我能够勇敢地面对挑战。在此，我再次向您表达我最深的敬意和感谢。

其次，我要感谢 404 实验室的同学们。我们共同度过了许多难忘的时光，一起探讨问题、分享经验、互相帮助。你们的陪伴让我的研究生生活更加丰富多彩，也让我感受到了团队的力量和温暖。在此，我祝愿你们前程似锦，未来可期。

此外，我还要感谢我的家人。是你们的无私付出和坚定支持，让我能够安心地追求自己的学术梦想。你们是我坚实的后盾，也是我不断前进的动力源泉。在此，我向你们表达我最深的爱意和感激之情。

最后，我要感谢学校提供的良好学习环境和资源。是学校的培养和关怀，让我能够在学术上不断取得进步。同时，我也要感谢所有在我求学道路上给予我帮助和支持的人们，是你们的善良和慷慨，让我感受到了人间的温暖和美好。

在未来的日子里，我将继续努力，不断进取，以更加优异的成绩回报社会、回报母校、回报所有关心和帮助过我的人。再次感谢你们，愿你们一切安好。

尚德敏学 唯实惟新

