

# 基于改进遗传算法的高速列车受电弓随网压力模糊控制方法研究

张阿龙, 韩聪信

温州大学电气与电子工程学院, 浙江 温州

收稿日期: 2026年3月5日; 录用日期: 2026年3月25日; 发布日期: 2026年4月8日

## 摘要

高速列车是当今社会重要的交通设施之一, 但在实际运行中, 弓网系统的跟随性能随工况变化而恶化, 导致受流质量不佳, 影响列车的安全可靠运行。为研究接触网与受电弓的跟随性能, 以受电弓随网压力为切入点, 以简单链式接触网和三质量块受电弓为研究对象构建弓网耦合动力学模型, 通过MATLAB仿真软件搭建相应模型, 设计弓网模糊控制器, 运用改进遗传算法(IGA)对控制器进行参数优化, 将所提优化方法与传统控制方法、模糊主动控制方法作对比, 实验结果表明: 优化后的控制方法相比被动控制, 随网压力标准方差提高了94.11%, 相比模糊主动控制, 提高了69.00%, 有效抑制了随网压力的波动, 提高了弓网受流质量, 且此方法具有较好的适应性和鲁棒性。

## 关键词

弓网系统, 动力学分析, 改进遗传算法, MATLAB仿真, 随网压力

# Research on Fuzzy Control Method for Pantograph-Catenary Following Contact Force in High-Speed Trains Based on an Improved Genetic Algorithm

Along Zhang, Congxin Han

College of Electrical and Electronic Engineering, Wenzhou University, Wenzhou Zhejiang

Received: March 5, 2026; accepted: March 25, 2026; published: April 8, 2026

## Abstract

High-speed trains are one of the most important transportation facilities in modern society. However, during actual operation, the tracking performance of the pantograph-catenary system deteriorates with varying operating conditions, leading to poor current collection quality and affecting the safe and reliable operation of trains. To investigate the tracking performance between the overhead contact line and pantograph, a coupled dynamics model was constructed using pantograph-catenary following contact force as the entry point, with a simple chain-type overhead contact line and a three-mass-block pantograph as research subjects. The corresponding model was built using MATLAB simulation software, and a fuzzy pantograph-overhead contact line controller was designed. An improved genetic algorithm (IGA) was employed for controller parameter optimization. The proposed optimization method was compared with traditional control methods and fuzzy active control methods. Experimental results demonstrate that the optimized control method achieves a 94.11% improvement in the standard deviation of pantograph-catenary following contact force compared to passive control and a 69.00% improvement compared to fuzzy active control. It effectively suppresses fluctuations in pantograph-catenary following contact force, enhances pantograph-catenary current collection quality, and exhibits excellent adaptability and robustness.

## Keywords

Pantograph-Catenary System, Dynamic Analysis, Improved Genetic Algorithm, MATLAB Simulation, Pantograph-Catenary Following Contact Force

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

社会经济发展推动轨道交通对高速列车运行速度提出更高要求, 而速度提升易导致弓网动态跟随性能下降。弓网随网压力作为弓网接触状态的直观表征, 其大小直接影响系统服役寿命与受流质量, 压力过大加剧弓网机械摩擦磨损[1][2], 过小则易引发离线、电弧放电等问题。考虑到列车运行环境的复杂性及弓网基础设施改造的高成本, 通过改进受电弓控制技术抑制随网压力波动、提升受流质量, 成为改善弓网动态接触性能的有效途径, 因此深入研究受电弓随网压力动态特性与控制策略, 对弓网系统优化设计和工程应用具有重要的理论与工程价值。

目前受电弓控制方法主要分为模糊控制、最优控制和变结构控制[3]三类, 国内外学者已开展大量相关研究并取得诸多成果。国内研究多结合仿真、试验与新兴技术开展控制策略探索, 部分学者分析了受电弓结构参数对跟随性的影响规律[4], 也有学者将卷积神经网络、长短时记忆网络[5]等技术引入受电弓控制, 实现了随网压力的精准调控与波动抑制; 国外研究则更侧重理论分析与先进控制策略开发, 多智能体强化学习[6]、H<sub>∞</sub>鲁棒控制[7]、模型预测控制[8]、深度强化学习[9]等方法被相继提出, 均在抑制随网压力波动、提升受流质量方面展现出良好效果。

现有研究仍为受电弓随网压力控制策略的深化探索留有空间, 本文以此为研究核心, 提出一种基于改进遗传算法的受电弓随网压力模糊控制方法。研究构建简单链式接触网与三质量块受电弓的耦合动力学模型, 在 MATLAB 平台搭建模糊控制仿真模型, 并通过改进遗传算法完成模型参数优化; 选取被动控



$$f_3 = \cos\left(\frac{\pi v}{L} t\right)$$

$$f_4 = \cos\left(\frac{\pi v}{L_1} t\right) \tag{3}$$

式中,  $k_0$  为接触网平均刚度, 单位为  $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $v$  为列车运行速度, 单位为  $\text{m/s}$ ;  $L$  为接触网的跨距, 单位为  $\text{m}$ ;  $L_1$  为接触网相邻吊线的间距, 单位为  $\text{m}$ ;  $f_i$  为对应接触网间距的波动余弦函数;  $\alpha$  为接触网的刚度差异系数。本文采用的接触网参数为:  $L = 48 \text{ m}$ ,  $L_1 = 10 \text{ m}$ 。

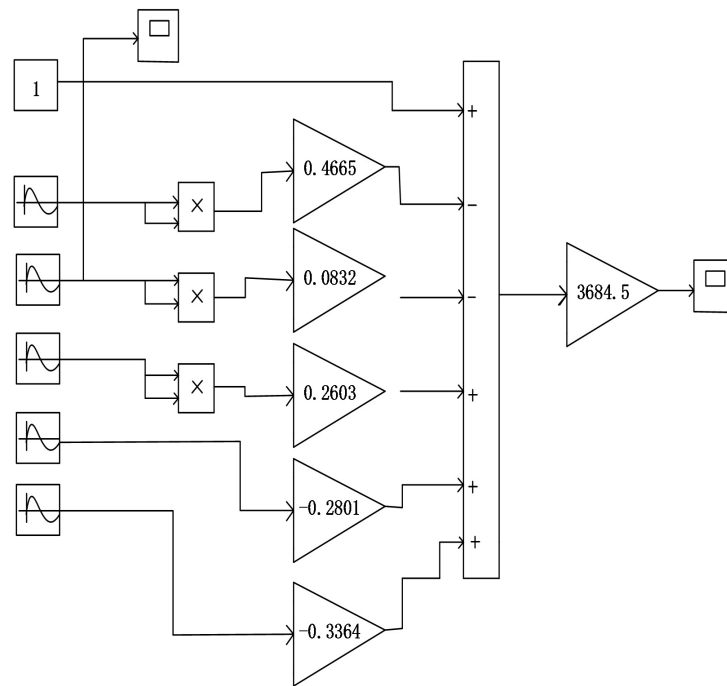
对于简单链式接触网有:  $k_0 = 3684.5$ ;  $\alpha_1 = 0.4665$ ;  $\alpha_2 = 0.0832$ ;  $\alpha_3 = 0.2603$ ;  $\alpha_4 = -0.2801$ ;  $\alpha_5 = -0.3364$ 。接触网参数如表 2 所示。

**Table 2.** Parameters of overhead contact system

**表 2.** 接触网参数

参数	数值
跨距/m	48
结构高度/m	1.6
承力索张力/kN	21
接触线张力/kN	27
吊弦个数	5
吊弦间距/m	4, 10, 10, 10, 4

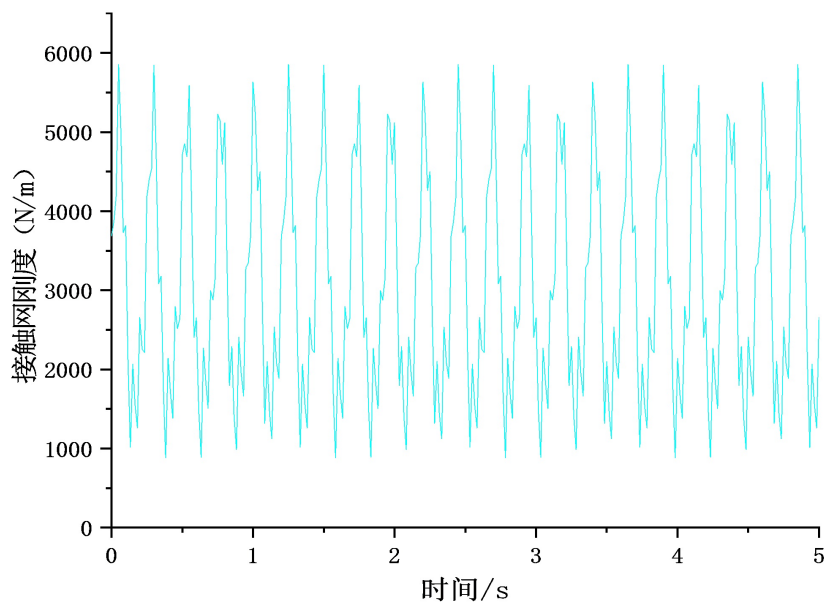
接触网刚度仿真模型如图 2 所示。



**Figure 2.** Simulation model of the stiffness of the overhead contact system

**图 2.** 接触网刚度仿真模型

仿真实时曲线如图 3 所示。

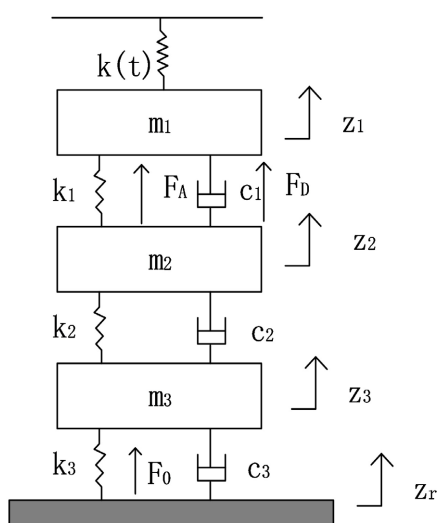


**Figure 3.** Simulation curve of variable stiffness of contact network  
**图 3.** 接触网变刚度仿真曲线

由图 3 可看出, 接触网刚度在列车运行过程中呈周期性变化, 且在吊弦点, 特别是支柱处出现局部峰值, 在吊弦间中心出现谷值, 印证了接触网张力分布理论模型的有效性。

## 2.2. 受电弓归算质量块等效模型

本文采用能够高效、准确地预测受电弓的动态行为的三元简化模型, 将受电弓弓头框架、上框架、下框架分别等效为一个弹簧质量系统, 且都具有一个自由度, 分别为  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$ , 受电弓三质量块模型图如图 4 所示。



**Figure 4.** Three-mass-block model of pantograph  
**图 4.** 受电弓三质量块模型

对于图 4 所示的模型, 根据牛顿第二定律, 可得其动力学微分方程组如下:

$$m_1 \ddot{z}_1 + c_1 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k_1 (z_1 - z_2) + k(t) z_1 = F_D + F_A \tag{4}$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + c_1 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_3) + k_2 (z_2 - z_1) = 0 \tag{5}$$

$$m_3 \ddot{z}_3 + c_2 (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) + c_3 (\dot{z}_3 - \dot{z}_r) + k_2 (z_3 - z_2) = F_0 \tag{6}$$

式中:  $m_i (i=1,2,3)$  分别为弓头、上框架和下框架的等效质量, 单位 kg;  $k_i (i=1,2,3)$  分别为弓头、下框架和上框架等效刚度, 单位 N/m;  $c_i (i=1,2,3)$  分别为弓头、上框架和下框架等效阻尼, 单位为 N\*s/m;  $z_r$  为列车扰动信号, 单位 m;  $F_A$  为气动抬升力,  $F_D$  为框架对弓头的抬升力,  $F_0$  为静抬升力, 单位都为 N。

气抬升力  $F_A$  计算公式为:

$$F_A = 0.00095v^2 + 0.0017v - 0.2 \tag{7}$$

则受电弓随网压力  $f_p(t)$  表达式为:

$$f_p(t) = k(t) z_1 - F_A - F_D - F_0 \tag{8}$$

为便于建立 simulink 模型并仿真, 将式(4)、(5)和(6)转化为积分形式如下。

$$\dot{z}_1 = \frac{1}{m_1} \iint [F_D + F_A - k_1 (z_1 - z_2) - c_1 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - k(t) z_1] dt^2 \tag{9}$$

$$\dot{z}_2 = \frac{1}{m_2} \iint [k_1 (z_1 - z_2) + k_2 (z_3 - z_2) + c_1 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + c_2 (\dot{z}_3 - \dot{z}_2)] dt^2 \tag{10}$$

$$\dot{z}_3 = \frac{1}{m_3} \iint [F_0 - k_2 (z_3 - z_2) + c_2 (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) + c_3 (\dot{z}_3 - \dot{z}_r)] dt^2 \tag{11}$$

由式(9)、(10)和(11)建立的仿真模型如图 5 所示, 采用的 SSS400+型受电弓参数[11]如表 3 所示。

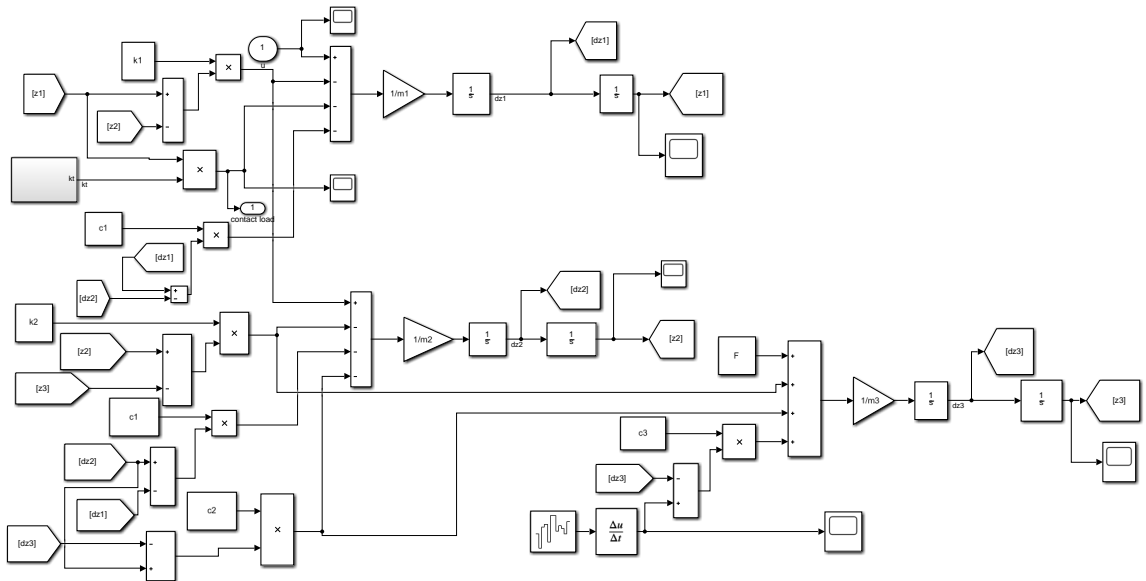


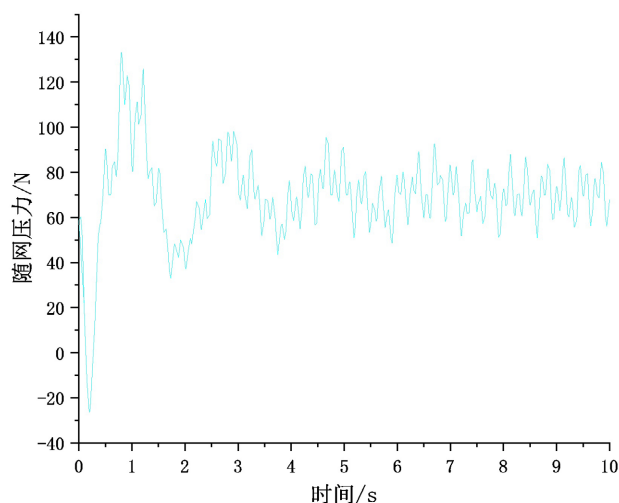
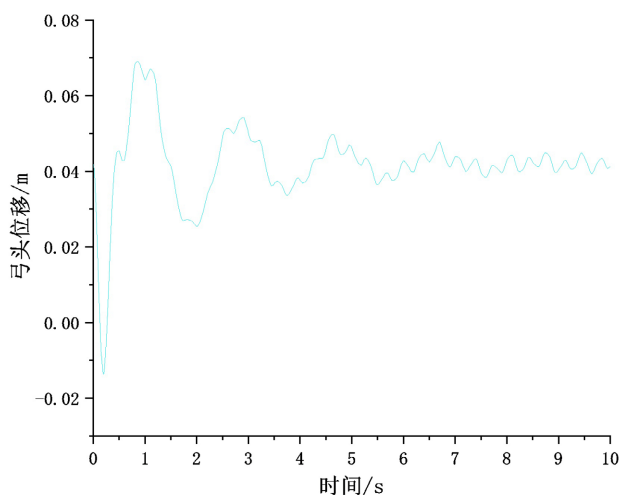
Figure 5. Simulation model of pantograph-catenary coupling system

图 5. 弓网耦合系统模型图

**Table 3.** Structural parameters of SSS400+ type pantograph**表 3.** SSS400+型受电弓结构参数

等效质量/kg	等效刚度(N/m)	等效阻尼(N * s/m)
$m_1 = 6.1$	$k_1 = 10,400$	$c_1 = 10$
$m_2 = 10.2$	$k_2 = 10,600$	$c_2 = 0$
$m_3 = 10.3$	$k_3 = 0$	$c_3 = 120$

由图 5 弓网耦合系统仿真模型可得在运行速度 200 km/h 工况下受电弓随网压力和弓头位移的实时动态曲线, 如图 6、图 7 所示。

**Figure 6.** Simulation diagram of rungang system according to network pressure**图 6.** 弓网系统随网压力仿真图**Figure 7.** Displacement of the pantograph head**图 7.** 受电弓弓头位移

由图 6、图 7 可知, 受电弓随网压力和弓头位移波动都比较明显且趋势接近, 侧面说明弓网耦合系统的动态波动是由接触网刚度变化引起的; 且与图 3 对比可知, 两者波动与接触网刚度波动趋势相近, 说

明该仿真模型真实有效, 同时弓网耦合系统的受流性能可以进一步优化。

### 3. 弓网模糊控制器设计与优化

#### 3.1. 模糊控制原理

模糊控制系统主要包含四个关键部分: 模糊化, 模糊规则, 模糊推理和解模糊化。模糊控制原理如图 8 所示。

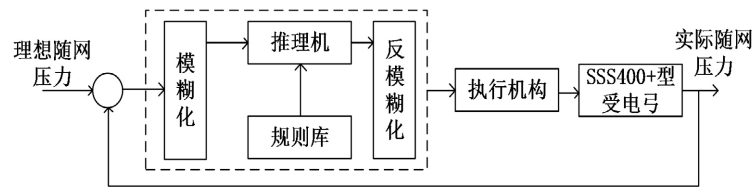


Figure 8. Principle diagram of fuzzy control  
图 8. 模糊控制原理图

#### 3.2. 模糊控制核心架构

模糊控制的核心逻辑依赖于规则库的支撑, 通常由控制器参数库与模糊推理规则库两部分组成, 模糊规则表如表 4 所示。

Table 4. Fuzzy control rule table  
表 4. 模糊控制规则表

e ec	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PM	PS
NM	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PS
NS	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	NM
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PM	PS	NS	NM	NS	NB	NB	NB
PB	NS	NM	NB	NB	NB	NB	NB

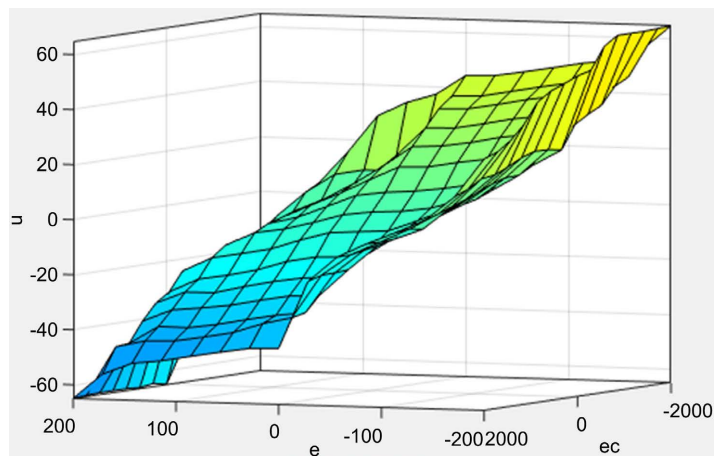


Figure 9. Visual representation of fuzzy control rule table  
图 9. 模糊控制规则表可视图

将随网压力偏差  $e$ 、偏差变化率  $ec$  和实际随网压力  $u$  设置相同的语言值, 其中 NB 表示负大、NM 表示负中、NS 表示负小、ZO 表示零、PS 表示正小、PM 表示正中、PB 表示正大, 分别用数字 1~7 表示。模糊条件语句为: If  $e$  is NB and  $ec$  is NB then  $u$  is NB 对应模糊规则表共有 49 条模糊条件语句。另外, 三种隶属度函数均采用表示简单且能达到控制精度的三角形。

由图 9 可看出模糊规则表设置的正确性。

### 3.3. 模糊控制优化

在弓网系统模糊控制器架构中, 以受电弓弓头为受控对象, 选取随网压力偏差  $e(t)$  及偏差变化率  $de(t)/dt$  作为控制器输入, 输出量为弓头随网压力; 控制器核心目标为抑制随网压力波动, 使其稳定趋近于 70N 的设定值。为高效搜索全局最优解, 引入改进遗传算法(IGA)对模糊控制器  $e(t)$  论域进行优化[12], 该算法采用实数编码, 编码向量直接对应待优化的论域边界参数; 初始种群生成范围基于仿真数据动态设定, 上限取原始数据波动范围的 3 倍, 下限取原始数据波动范围的 1/3 初始个体按对应公式生成。

$$Pop = rand * (P_{max} - P_{min}) + P_{min} \quad (12)$$

其中  $rand$  为[0, 1]区间内的随机数,  $P_{max}$  与  $P_{min}$  分别代表待优化参数的上下限; 通过该公式可将均匀分布的随机数映射至预设参数区间, 实现初始个体参数的合理生成。适应度函数设定为随网压力偏差绝对值积分的倒数, 具体如式(12)所示。该设计可使随网压力偏差积分最小的控制参数对应最大适应度值, 改进遗传算法通过迭代寻优, 能够获得使随网压力围绕 70 N 设定值波动最小的最优论域参数。

$$Fit = \frac{1}{\int |e|} \quad (13)$$

运行仿真程序, 得到误差绝对值积分曲线如图 10 所示。

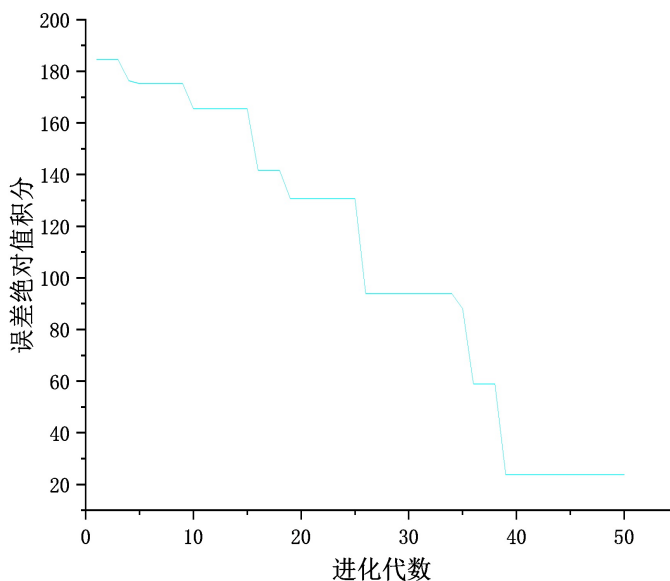


Figure 10. Curve of absolute error integral change  
图 10. 误差绝对值积分变化曲线

改进遗传算法(IGA)的三个核心算子设计如下:

1) 自适应选择算子: 引入精英保留策略, 将每代种群中适应度排名前 10% 的个体直接遗传至下一代, 有效保留优良基因, 降低优秀个体被淘汰的概率, 保障寻优方向的合理性。

2) 自适应交叉算子: 摒弃固定交叉概率模式, 基于种群适应度方差动态调整交叉概率; 当种群个体趋同时增大交叉概率以提升基因多样性, 当个体分散时减小交叉概率以稳定优良基因。

3) 自适应变异算子: 采用改进型基本位变异策略, 以待优化参数上下限的均值为中心进行随机扰动生成新个体。具体而言, 先生成[0, 1]区间随机数并平移至[-0.5, 0.5]区间, 将其与参数上下限差值相乘后叠加均值, 即可得到预设范围内的变异参数。该机制可确保变异操作始终处于参数合理取值区间, 避免无效变异, 同时通过对称扰动兼顾种群多样性与最优解稳定性, 有效提升算法在弓网系统模糊控制器论域参数优化中的全局最优解搜索效率。

$$Pop = \bar{P} + (P_{max} - P_{min}) * (rand - 0.5) \tag{14}$$

改进遗传算法流程如图 11 所示。

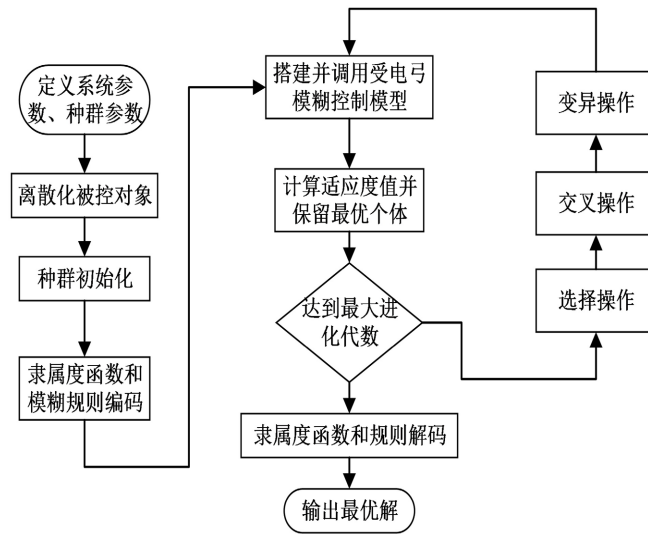


Figure 11. Flowchart of improved genetic algorithm  
图 11. 改进遗传算法流程图

## 4. 仿真结果与分析

### 4.1. 结果分析

列车运行速度设置为 250 km/h, 静抬升力为 70 N。弓网系统模糊控制仿真模型如图 12 所示。

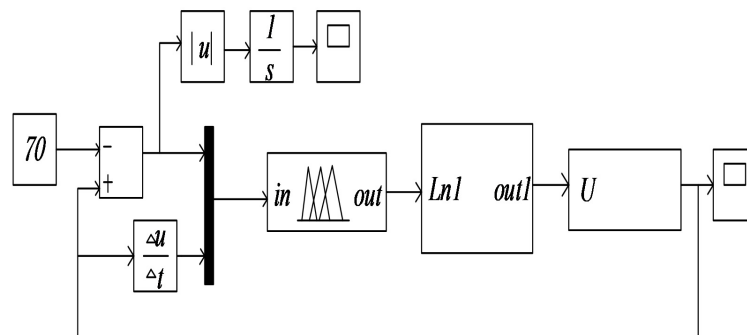


Figure 12. Fuzzy control simulation model of the pantograph-rod system  
图 12. 弓网系统模糊控制仿真模型

由图 12 可得到弓网系统随网压力在被动控制、模糊主动控制、改进遗传算法优化后的模糊主动控制下的动态仿真曲线如图 13 所示, 曲线的相关参数指标如表 5 所示。

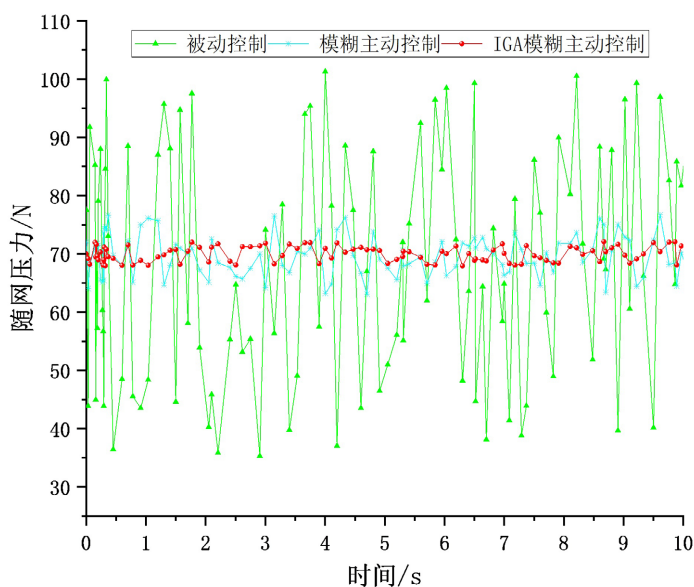


Figure 13. Simulation diagram of network pressure at 250 km/h  
图 13. 250 km/h 下随网压力仿真图

Table 5. Relevant parameters dependent on network pressure under different control modes  
表 5. 不同控制方式下随网压力的相关参数

	最大值 $F_{\max}$	最小值 $F_{\min}$	平均值 $F_{\text{av}}$	不均匀系数 $c$	标准方差 $\sigma$
被动控制	104.945	35.546	67.760	0.300	20.320
模糊主动控制	76.000	63.006	70.283	0.055	3.859
优化模糊主动控制	72.098	67.938	70.010	0.017	1.196

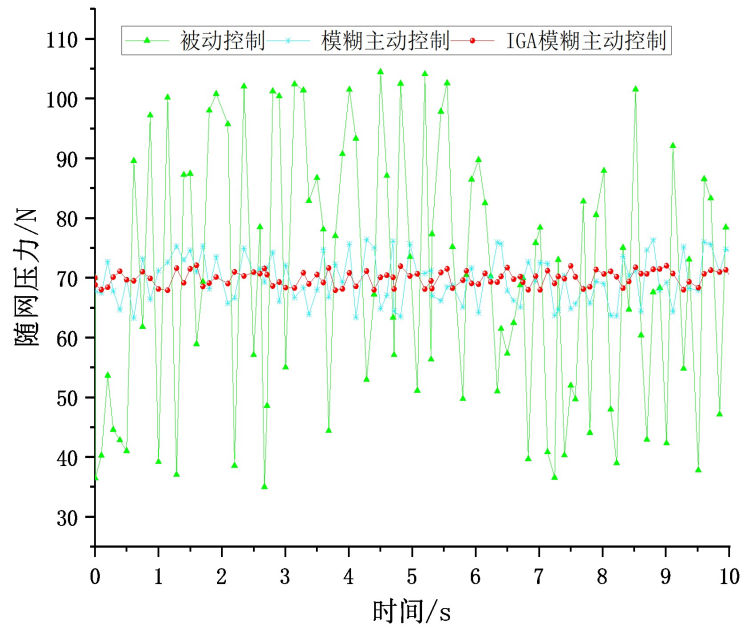
结合图 13 与表 5 的仿真结果可看出, 不同控制策略下受电弓随网压力的波动幅值呈明显梯度分布, 由大至小依次为: 被动控制、模糊主动控制、IGA 模糊主动控制。这一结果表明, IGA 模糊主动控制策略能显著抑制随网压力的动态波动, 有效提升弓网系统的受流质量。同时, 三种控制方式下随网压力的标准差均满足欧洲铁路标准中  $\sigma < 0.3F_{\max}$  的要求, 验证了本次仿真结果的有效性。

为规避单一工况仿真结果的偶然性, 同时验证所提优化控制策略在不同运行速度下的适配性, 本文基于上述优化参数, 进一步在 200 km/h 与 300 km/h 的运行速度下开展受电弓随网压力仿真验证, 结果如图 9 所示。

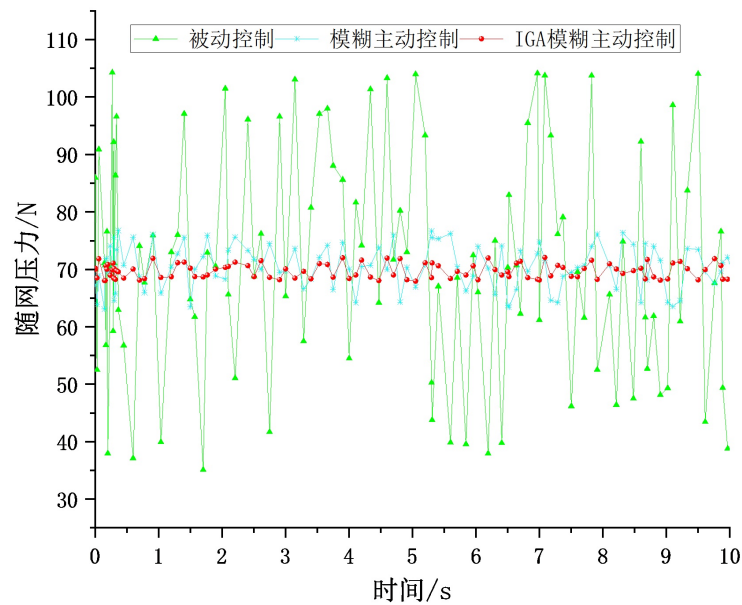
结合图 13 与图 14 的实验结果可分析得出, 随列车运行速度的提升, 受电弓随网压力的最大值呈整体上升趋势, 最小值则表现出整体下降特征, 对应的压力标准差持续增大; 这一变化表明速度提升会导致受电弓对接触网的动态跟随性能劣化, 最终造成弓网系统的受流质量显著下降。

## 4.2. 结果验证

由于改进遗传算法初始种群生成和优化过程具有随机性, 为验证是否具有误差结果, 此处给出连续十次实验结果数据, 如表 6 所示。



(a) 200 km/h 下随网压力仿真图



(b) 300 km/h 下随网压力仿真图

**Figure 14.** Simulation diagram of network pressure under different speeds  
**图 14.** 不同速度下随网压力仿真图

**Table 6.** Data of IGA optimization control results for ten consecutive sessions

**表 6.** IGA 优化控制连续十次结果数据

实验次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
结果数据	70.197	68.496	71.823	68.034	68.045	70.615	69.993	70.836	68.968	69.888

通过上表数据可明显看出结果数据的波动性不明显, 整体方差  $\sigma^2 = 1.438$ , 表明此算法具有优异的控制

制稳定性和强鲁棒性。

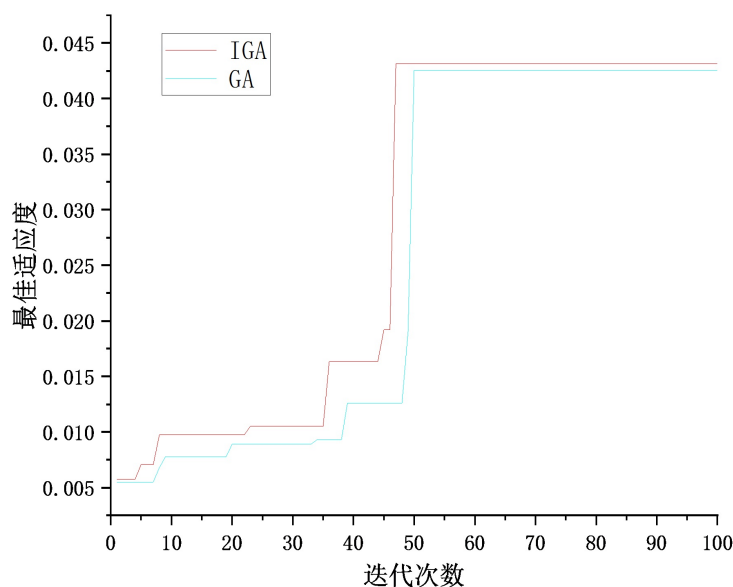
为进一步补充改进遗传算法的优越性, 这里将其和传统遗传算法进行对比, 实验结果如表 7 所示。

**Table 7.** Comparison data of IGA and GA results

**表 7.** IGA 与 GA 结果对比数据

试验次数	1	2	3	4	5
IGA	最大值	72.053	72.100	72.096	72.095
	最小值	67.928	67.913	67.903	67.929
	平均值	69.991	70.007	70.000	70.012
	均方差	2.063	2.094	2.096	2.083
GA	最大值	76.775	76.867	76.987	76.951
	最小值	63.107	63.002	63.068	63.129
	平均值	69.941	69.935	70.028	70.040
	均方差	6.834	6.933	6.960	6.911

传统遗传算法在迭代后期因种群多样性衰退易陷入局部最优, 致使随网压力控制产生显著波动; 相比之下, 引入自适应交叉变异与精英保留策略等方式的改进遗传算法, 能有效维持种群进化活力, 随网压力控制整体平均波动优化了 69.82%, 控制稳定性能更好。



**Figure 15.** Comparison chart of convergence speed between IGA and GA

**图 15.** IGA 与 GA 收敛速度对比图

从图 15 可以看出, IGA 的收敛速度显著快于 GA, 这一结果表明, IGA 通过自适应选择、交叉与变异算子的优化设计, 能够更高效地引导种群向最优解收敛, 在迭代前期即可快速提升适应度, 有效缩短了算法寻优的时间成本, 体现了其在弓网系统模糊控制器参数优化中的高效性与优越性。

## 5. 结语

(1) 受电弓随网压力与弓头位移均呈现显著的波动特征, 且二者波动趋势高度一致, 从侧面印证弓网

耦合系统的动态波动主要由接触网刚度的动态变化诱发。

(2) 以 250 km/h 运行速度工况为例, 经改进遗传算法优化的模糊控制策略, 相较被动控制使随网压力标准差降低 94.11%, 相较常规模糊主动控制使该指标降低 69.00%, 可有效抑制随网压力动态波动, 显著提升弓网系统受流质量。

(3) 十次独立重复优化实验的对比分析结果表明, 改进遗传算法在弓网系统随网压力控制中具备良好的适应性及鲁棒性; 与传统遗传算法的控制效果对比, 进一步验证了所提优化方法的优越性与有效性。

## 参考文献

- [1] 陈忠华, 李兵红, 陈明阳, 等. 弓网滑动电接触电磁热力耦合效应研究进展[J]. 电工技术学报, 2023, 38(10): 2777-2793.
- [2] Guo, F., Gu, X., Li, L., Wang, Z., Wang, T. and Jia, S. (2022) Effect of Surface Microparameters on Contact Temperature of Sliding Electrical Contact. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **18**, 5972-5981. <https://doi.org/10.1109/tii.2021.3135426>
- [3] 吴延波, 韩志伟, 王惠, 等. 基于双延迟深度确定性策略梯度的受电弓主动控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(14): 4547-4556.
- [4] 孔令楠, 周宁, 程尧, 等. 基于传递函数的高速受电弓跟随性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(2): 533-542.
- [5] 陈仁祥, 王帅, 杨黎霞, 等. 弓网接触力长短时记忆网络预测的受电弓主动控制与仿真[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 192-198.
- [6] Wang, H., Han, Z., Liu, W. and Wu, Y. (2024) A Reinforcement Learning-Based Pantograph Control Strategy for Improving Current Collection Quality in High-Speed Railways. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, **35**, 5915-5928. <https://doi.org/10.1109/tnnls.2022.3219814>
- [7] Yu, P., Liu, K., Yokoyama, M. and Wu, M. (2018) Robust Control of Contact Force for Pantograph-Catenary System. 2018 57th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), Nara, 11-14 September 2018, 713-718. <https://doi.org/10.23919/sice.2018.8492702>
- [8] Ioan Chiriac, A., Constantin Olteanu, S. and Popescu, D. (2020) Model Predictive Control Approach for a Pantograph-Catenary System (PAC) Described by a Transfer Function Model. 2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, 8-10 October 2020, 733-738. <https://doi.org/10.1109/icstcc50638.2020.9259700>
- [9] Wang, Y., Wang, Y., Chen, X., Wang, Y., Wang, S. and Chang, Z. (2024) A Deep Reinforcement Learning Based Pantograph Active Control Strategy. 2024 7th International Conference on Mechatronics and Computer Technology Engineering (MCTE), Guangzhou, 23-25 August 2024, 564-567. <https://doi.org/10.1109/mcte62870.2024.11117641>
- [10] 张宗芳. 单链形悬挂接触网刚度分布对弓网受流质量影响[J]. 延安职业技术学院学报, 2020, 34(6): 95-100.
- [11] 王喜利. 弓网动态特性及其对电磁噪声的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2016.
- [12] 陈刚, 乔依林, 刘星辰, 等. 基于改进遗传算法的凝汽器机理模型参数优化方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2025(11): 27-31.