

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416245

# 基于数据分段拟合的受电弓性能检测误差补偿<sup>\*</sup>

赵二朋<sup>1</sup> 李志琦<sup>1</sup> 牛青雨<sup>1</sup> 冯文利<sup>1,2</sup>

(1. 石家庄铁道大学电气与电子工程学院 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学河北省交通电力网智能融合技术与装备协同创新中心 石家庄 050043)

**摘要:** 静态接触力是评价受电弓性能的一项重要指标,也是衡量弓网接触质量的重要因素,直接影响着列车行驶安全。传统测量方法存在效率低、精度差等问题,本文基于物联网云、管、端的思路,研发了一种车载式受电弓性能检测装置,并提出了一种自适应分段数据拟合算法,以优化检测精度。该算法将数据分段与曲线模型寻优同时进行,通过逐步扩大区间长度和多项式、指数、高斯、傅里叶、幂函数五种拟合模型的评估,在最优点实现自适应分段。实验表明,该拟合算法使检测装置的平均误差率从1.91%下降至0.21%,优于文中其他对比拟合算法,显示出良好的精度补偿效果。

**关键词:** 受电弓检测;静态接触力;误差补偿;分段拟合

**中图分类号:** TP202;TN87 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

## Error compensation of pantograph performance detection based on data segment fitting

Zhao Erpeng<sup>1</sup> Li Zhiqi<sup>1</sup> Niu Qingyu<sup>1</sup> Feng Wenzhao<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Hebei Provincial Collaborative Innovation Center of Transportation Power Grid Intelligent Integration Technology and Equipment, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Static contact force is an important index to evaluate the performance of pantograph, and also an important factor to measure the contact quality of pantograph, which directly affects the safety of train running. Traditional measurement methods have problems such as low efficiency and poor accuracy. Based on the idea of cloud, tube and terminal of the internet of things, this thesis develops a vehicle-mounted pantograph performance detection device, and proposes an adaptive segmental data fitting algorithm to optimize detection accuracy. The algorithm performs data segmentation and curve model optimization at the same time, and realizes adaptive segmentation at the best point by gradually expanding interval length and evaluating five fitting models: polynomial, exponential, Gaussian, Fourier and power function. The experimental results show that the average error rate of the measuring device is reduced from 1.91% to 0.21%, which is better than other matching methods in the thesis and shows a good precision compensation effect.

**Keywords:** pantograph detection; static contact force; error compensation; segment fitting

## 0 引言

近年来,高速铁路的快速发展极大地推动了我国经济社会的发展<sup>[1]</sup>。截至2023年底,全国高铁里程达4.5万公里<sup>[2]</sup>。受电弓作为电力机车获取能源的主要高压设备,其性能直接影响着列车的运行安全<sup>[3]</sup>。受电弓起弓性能是指受电弓从落弓位置升至集流工作的最高点的过程中体现的

能力<sup>[4]</sup>,重点研究的是受电弓工作范围内的静态接触力。传统的接触力检测方法为人工检测法<sup>[5]</sup>,耗费人力且存在安全隐患,无法满足日益增长的检修需求。接触式检测方法是通过对传感器实现对受电弓的检测。但接触式检测技术<sup>[6]</sup>容易受到机械结构、环境等因素影响,使检测结果偏离真实值。因此,有必要研制一款智能、便携的受电弓检测系统并对其进行误差补偿,以提高其环境适应性<sup>[7]</sup>。

收稿日期:2024-06-17

\* 基金项目:河北省高等学校科学技术研究项目(QN2023183)资助

相关研究人员已在受电弓性能检测领域展开大量探索。冯云杰<sup>[8]</sup>设计了一套受电弓升弓特性自动测试系统,通过移动机械臂来检测受电弓静态接触力,但其体积庞大,需要固定安装地点,不能实现随时检测。随着智能嵌入式技术的迅速发展,便携式检测设备陆续涌现。柳贵东<sup>[9]</sup>设计了一种便携式受电弓检测装置,该装置分为检测单元和显示单元两部分,通过检测单元外壳上的挂钩连接受电弓实现静态接触力检测,其小巧便携,但功能不够齐全。庞泽鹏<sup>[10]</sup>研制了一套便携式受电弓检测仪控制系统,该系统以微处理器(advanced risc machine, ARM)为控制核心,触摸屏为人机交互界面,结构小巧,使用方便。

上述设计方案在不同程度上对受电弓的检测设备进行了改进,均属于接触式检测技术,但都缺乏对检测精度的进一步调整和优化。在实际使用中,需要对传感器的输出误差进行校正和补偿。刘付鹏等<sup>[11]</sup>采用线性拟合对磁通量传感器进行温度补偿,利用得到的温度补偿系数,对系统测试数据进行线性补偿修正,但这种方案只适合于传感器类型单一、数据特性不复杂的情况。卢志浩等<sup>[12]</sup>在研究中采用传统卡尔曼滤波算法处理检测数据,实验显示该算法能有效消除检测结果中的突变、毛刺等极端数据,但当极端数据偏离过于明显时,处理后的数据仍可能含有较大误差。沈晓卫等<sup>[13]</sup>提出一种自适应分段温度补偿方法,该方法主要依赖于多项式拟合来适应分段内的温度特性,仅针对特定误差曲线的传感器效果良好,不具有普适性。李达等<sup>[14]</sup>提出一种粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)的 BP 神经网络算法,通过对神经网络模型的优化提高了误差补偿的效果,处理后的检测数据平均误差较低,但局部个体的检测误差仍然很大,且需要较高的硬件支持。殷家伟等<sup>[15]</sup>提出了一种分段拟合方法对受电弓检测装置进行误差补偿,在数据特征分段过程中涉及到阈值参数的设置,且所使用的分段模型对后续曲线绘制时的寻优模型有一定影响,在处理不同的多组数据时,效果难以保证。

本文根据受电弓运行的特点,结合物联网技术,研究设计了一种车载式受电弓性能检测系统,并提出一种改进多模型全数据区间寻优的自适应分段拟合方法,在分段时综合考虑数据分布特点和预拟合模型的影响,采用五种拟合模型进行寻优,实现了高精度拟合,以较低的硬件成本消耗和计算量,对所设计车载式受电弓检测装置的输出误差进行补偿,提高受电弓检测装置在复杂运行环境下的检测精度。

## 1 误差来源分析

图 1 所示为车载式受电弓性能检测系统。

以受电弓在工作范围内不同高度下的静态接触力作为检测指标,结合现场的情况进行了检测系统的总体设计。误差主要来自于检测终端,结构简图如图 2 所示,检测终端设备使用 STM32 作为控制器,安装于受电弓底部支架上。

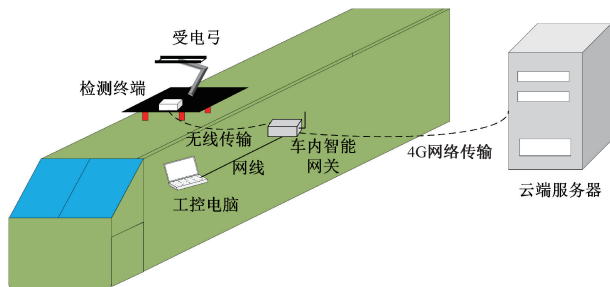


图 1 受电弓检测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pantograph detection system

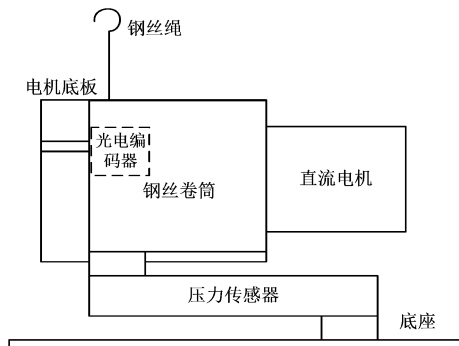


图 2 检测终端结构简图

Fig. 2 Detection terminal structure schematic

其主要部件是钢丝绳卷筒、电机、传感器、底座。

受电弓检测装置测量静态压力时,钢丝绳一端挂在弓头滑板位置。通过电机驱动卷筒控制钢丝绳匀速收放,实现受电弓匀速运动,压力传感器间接测量钢丝绳拉力,进而测出受电弓不同升弓高度的静态接触压力。图 3(a)所示为受电弓,图 3(b)所示为检测终端安装位置。



(a) 受电弓  
(a) Pantograph  
(b) 安装位置  
(b) Installation location

图 3 实验室检测环境

Fig. 3 Laboratory testing environment

### 1.1 检测装置自身误差

压力传感器垂直受力分析如图 4 所示,钢丝绳给予电阻应变式压力传感器一端垂直向上的拉力,传感器另一端固定在底座上,压力传感器中间部分的应变电阻能够敏锐地感知到力的作用。

影响误差的因素之一是机械结构设计,压力检测采用两端受力,引起中间电阻应变片形变的方式,即使压力传感器精确度很高,但两端受力点距离中心点的长度也会影响

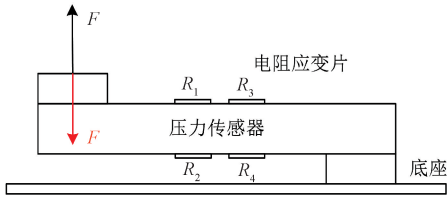


图4 压力传感器垂直受力分析图

Fig.4 Vertical force analysis diagram of pressure sensor

检测力的大小。此外,压力传感器的灵敏度误差和线性误差也会影响结果的准确性。

1.2 弓头横向摆动角度误差

在受电弓升弓过程中,由于受电弓结构的因素,弓头会产生横向摆动<sup>[16]</sup>。所以连接弓头端的钢丝绳不会保持竖直状态,会产生一个偏角,偏角受力分析如图5所示。



图5 压力传感器偏角受力分析图

Fig.5 Deflection force analysis diagram of pressure sensor

假设钢丝绳产生偏角为θ,此时底部压力传感器测量垂直向拉力F<sub>y</sub>大小如式(1)所示,其中θ值是随着受电弓升弓高度不断变化的,该偏角的存在也是影响现有便携式受电弓检测仪测力准确性的主要影响因素。

$$F_y = F \cos\theta \tag{1}$$

2 基于改进多模型寻优分段的曲线拟合算法

检测装置误差是综合的误差,无法用单一的关系式表示出来。而数据拟合可以用来研究和预测数据的行为,找到数据中的规律和趋势。

2.1 拟合与最小二乘法的概念

拟合即通过f(x)在若干点x<sub>i</sub>处的取值y<sub>i</sub>来推算出f(x)的近似表达式的过程。拟合的具体实现,就涉及到最小二乘法。最小二乘法(ordinary least square, OLS)是一种用于找到数据点最佳拟合曲线的数学优化技术。它通过最小化误差的平方和来寻找数据的最佳函数匹配,如式(2)所示,当指标R取最小值时,认为φ(x)是最优的拟合函数。

$$R = \sum_{i=1}^N (y_i - \varphi(x_i))^2 \tag{2}$$

2.2 拟合模型确立

本文采用多项式拟合、指数拟合、高斯拟合、傅里叶拟合、幂函数拟合5种拟合模型,以均方根误差作为拟合效果指标,对全数据区间遍历寻优分段,各拟合方程见式(3)~(7)。

$$y = \sum_{i=1}^{n+1} p_i x^{n+1-i} \tag{3}$$

$$y = \sum_{i=1}^n a_i \exp(b_i x) \tag{4}$$

$$y = \sum_{i=1}^n a_i \exp(-((x - b_i)/c_i)^2) \tag{5}$$

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(i\omega x) + b_i \sin(i\omega x) \tag{6}$$

$$y = a \exp(b) + c \tag{7}$$

2.3 改进分段拟合算法

在现有的数据分段方法中,通过设定阈值来判断分段的方式往往带有随机性,并且常将数据分段与曲线绘制作为两个独立的过程进行,这导致了预拟合模型对分段结果和后续曲线拟合产生显著影响。本文提出一种创新的数据分段与曲线绘制方法,该方法的核心优势在于:

1)全数据点遍历与多模型寻优:通过遍历全数据点,并利用多项式拟合、指数拟合、高斯拟合、傅里叶拟合、幂函数拟合五种不同的模型进行寻优分段,从而消除了传统方法中阈值设置等干扰因素,提高了分段的准确性和可靠性。

2)综合考虑数据分布与模型因素:在数据分段过程中,不仅考虑了数据的分布特征,还结合了模型因素,确保用于曲线绘制的模型与最优分段所选出的模型保持一致,这有助于提升最终曲线拟合的精度和效果。

整个数据分段与曲线拟合的流程如图6所示。

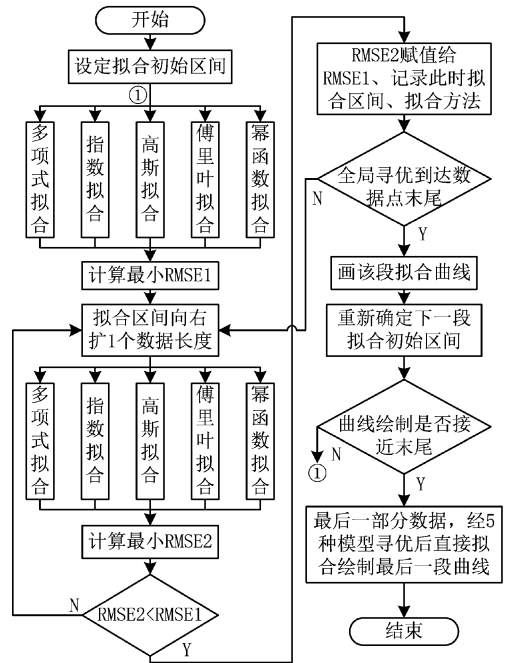


图6 改进分段拟合流程图

Fig.6 Improved segmentation fitting flowchart

详细的算法流程如下:对于给定的数据集(1~n),设定一个最小数据点数a作为拟合一段曲线的基准。从数据集的第一个数据点开始,连续读取a个数据点,并利用5种不同的拟合模型进行预拟合,计算并比较各模型的均方根误差(root-mean-square error, RMSE)值,选择RMSE最小的

模型作为该数据段的最佳拟合模型,并记录其 RMSE 值、拟合模型和数据区间。随后,增加一个数据点(即  $a+1$  个数据点),重复上述步骤,比较新的 RMSE 值与上一个数据段的 RMSE 值。如果新的 RMSE 值更小,则更新数据区间和最佳拟合模型;否则,保持上一数据段的信息不变。这一过程将持续进行,直到遍历完整个数据集。

在分段拟合的最后阶段,为了避免剩余数据点过少导致无法进行有效拟合,设定了阈值  $b$ 。当最后一段数据的长度小于  $b$  时,将这部分数据视为整体,使用五种拟合模型进行寻优,并选择效果最好的模型来绘制最后一段曲线。

2.4 拟合评价指标

本文中判定拟合效果的参数为均方根误差(RMSE),其定义为预测值与真实值偏差的平方和与观测次数  $m$  比值的平方根。RMSE 值越接近 0,代表拟合效果越好。具体表达式见式(8)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (h(x^{(i)}) - y^{(i)})^2} \quad (8)$$

以相对误差作为误差补偿效果的评判标准,具体表达式如下:

$$\delta = \Delta/L \times 100\% \quad (9)$$

其中,  $\delta$  为相对误差,用百分数表示;  $\Delta$  为绝对误差;  $L$  为实际值。

3 实验结果与分析

使用标准拉力计对检测装置进行数据采集,记录拉力计标准值与检测装置检测值,所使用的检测装置和拉力计如图 7 所示。受电弓静态接触力有限范围为 50~80 N,因此数据集也保持在这个范围内。根据要求采集 78 组数据,从小到大依次排列。随机抽取 63 组作为训练集拟合曲线,剩余 15 组数据用于检验拟合效果。

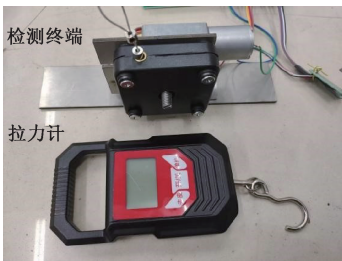


图 7 检测装置与标准拉力计

Fig. 7 Testing device and standard tension meter

测量误差如图 8 所示,横坐标为检测装置输出的接触力值,纵坐标为绝对误差值。由图中信息可知,在有效检测量程内检测终端的输出误差在一定范围内波动,且测量到的接触力值越大,绝对误差也就越大。因此,在投入使用前必须要对检测终端的输出误差进行补偿。

取其中 63 组数据作为训练集,用于后续实验中的拟合曲线,训练集数据见表 1。再将剩下的 15 组作为测试集对

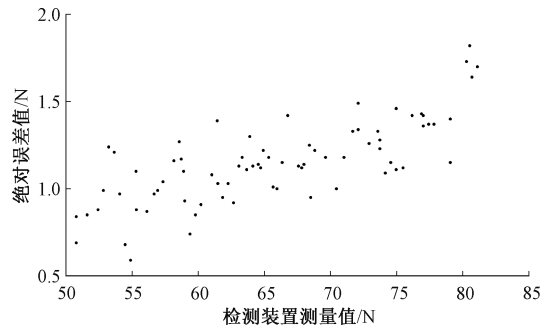


图 8 检测终端输出误差情况

Fig. 8 Detect terminal output errors

拟合方案效果进行验证,测试集数据见表 2。

表 1 训练集数据

Table 1 Training set data

标准值	测量值	标准值	测量值	标准值	测量值
49.95	50.79	60.46	61.49	68.45	69.63
50.76	51.61	60.90	61.85	69.45	70.45
51.55	52.43	61.23	62.26	69.84	71.02
51.85	52.84	61.75	62.67	70.35	71.68
52.00	53.24	61.95	63.08	70.75	72.09
52.45	53.66	62.15	63.33	71.65	72.91
53.10	54.07	62.55	63.66	72.10	73.58
53.80	54.48	63.00	64.13	72.45	73.73
54.30	54.89	63.40	64.54	73.05	74.14
54.45	55.33	63.60	64.72	73.40	74.55
55.25	56.12	63.70	64.92	73.85	74.96
55.71	56.68	64.15	65.33	74.60	75.78
56.30	57.34	64.65	65.66	74.75	76.17
57.00	58.16	64.95	65.95	75.45	76.88
57.30	58.57	65.20	66.35	75.65	77.01
57.55	58.72	65.35	66.77	76.05	77.42
58.05	58.98	66.45	67.58	76.45	77.82
58.65	59.39	66.70	67.82	77.65	79.05
58.95	59.80	66.85	67.99	78.55	80.28
59.30	60.21	67.15	68.40	79.05	80.69
59.95	61.03	67.85	68.81	79.40	81.10

表 2 测试集数据

Table 2 Test set data

标准值	测量值	标准值	测量值	标准值	测量值
50.10	50.83	60.39	61.44	72.71	73.87
53.46	54.32	62.60	63.90	74.08	75.26
54.41	55.30	66.97	68.11	75.82	77.24
55.95	56.94	67.55	68.50	78.24	79.55
57.92	58.90	71.06	72.39	78.70	80.52

使用 MATLAB 软件对本文所提出的改进算法进行验证,图 9 所示为各分段曲线绘制在一起的拟合曲线,横坐标为检测装置测量值,纵坐标为准实际值。根据分段拟合结果可知,拟合曲线被分为 11 段,为了便于观察分段点,将两个相邻分段曲线的原数据点使用不同形式的点代替,“·”字符和“\*”字符交替出现,二者交会处即为分段点。

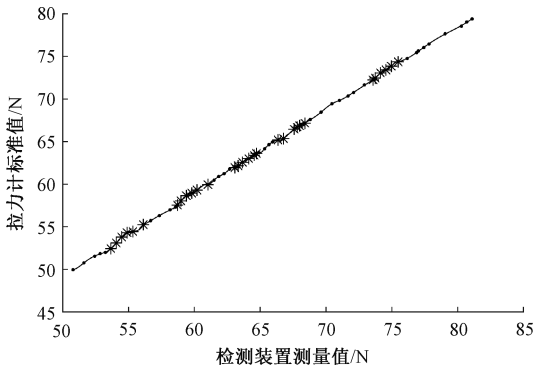


图 9 改进分段拟合曲线图

Fig.9 Detect terminal output errors

拟合曲线分段信息见表 3,根据寻优策略,第 7 段和第 9 段使用的是高斯拟合模型,其他段使用的都是傅里叶拟合模型。这是因为傅里叶模型能精确拟合周期函数,而检测装置数据的随机波动及部分周期特性较为明显,故整体精度高于其他模型。高斯拟合则在波峰状数据区间表现较好,但总体效果略差于傅里叶拟合模型。

表 3 拟合曲线分段信息

Table 3 Fit curve segmentation information

分段	拟合函数	RMSE
50.79~53.66	傅里叶	0.128 3
53.66~56.12	傅里叶	0.125 7
56.12~58.72	傅里叶	0.110 9
58.72~61.03	傅里叶	0.100 9
61.03~63.08	傅里叶	0.094 5
63.08~64.72	傅里叶	0.094 4
64.72~66.35	高斯	0.100 8
66.35~68.40	傅里叶	0.097 9
68.40~73.58	高斯	0.088 0
73.58~75.48	傅里叶	0.057 6
75.48~81.10	傅里叶	0.035 3

使用训练集对本文拟合方案效果进行验证,以相对误差作为误差补偿效果的评判标准,训练集共有 15 组数据,采用绝对值方式进一步计算其平均相对误差,与补偿前检测数据的平均相对误差对比见表 4。

由表 4 可知,检测装置输出结果的平均相对误差由 1.91% 下降至 0.21%,证明本文提出的多模型寻优自适应

表 4 补偿前后误差对比

Table 4 Compensation before and after error comparison

名称	平均相对误差/%
补偿前	1.91
补偿后	0.21

分段拟合算法可以有效补偿检测装置的输出误差,特别是针对较大误差的补偿更为明显,平均相对误差显著下降。

为验证本文算法的补偿效果,进行了多项式拟合和神经网络拟合两组对比试验。将多项式方案分为常规拟合和分段拟合两种,由于本文提出的改进算法所使用的 5 个模型都是 2 阶模型,因此对比实验的多项式拟合模型也设定为 2 阶。而神经网络拟合是一种新兴的拟合方法,通过模仿生物神经网络的结构和功能,对函数进行估计或近似,其中 BP 神经网络目前应用于多个技术领域,它是一种多层前馈神经网络<sup>[17]</sup>,本文选用 PSO-BP 神经网络作为对比模型。二阶多项式传统拟合和分段拟合结果分别如图 10(a)、(b)所示。PSO-BP 神经网络模型训练结果和预测结果分别如图 11(a)、(b)所示。

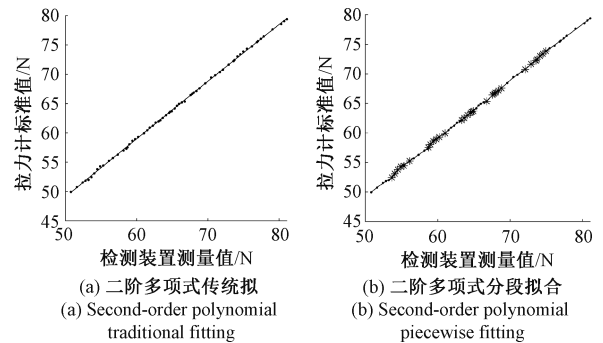


图 10 二阶多项式拟合结果

Fig.10 Second order polynomial fitting results

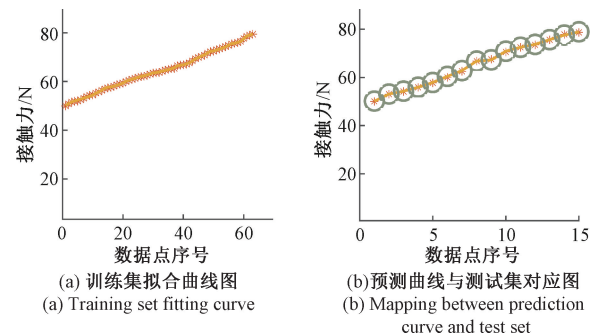


图 11 PSO-BP 神经网络拟合结果

Fig.11 PSO-BP neural network fitting results

经过改进多模型寻优分段曲线拟合误差补偿算法补偿后,检测终端输出的平均相对误差降低为 0.21%,相比于二阶多项式传统拟合、分段拟合和神经网络拟合的 0.36%、0.27%和 0.22%,有更好的补偿效果。多项式拟

合的方法多适用于线性误差的补偿,受电弓检测终端的输出误差具有非线性,其中传统多项式拟合的效果较差,使用分段策略后补偿效果显著提高,平均相对误差从 0.36%降低到 0.27%。各算法补偿效果对比如表 5 所示。

表 5 各算法补偿效果对比

Table 5 Comparison of the compensation effect of each algorithm

名称	平均相对误差/%
补偿前	1.91
二阶多项式传统拟合	0.36
二阶多项式分段拟合	0.27
PSO-BP 神经网络拟合	0.22
改进多模型寻优分段拟合	0.21

从实验结果可以看出,PSO-BP 神经网络补偿模型具有较好的补偿精度,它可以学习非线性关系,更好的适应实际数据中的复杂关系,拟合效果与本文算法相近,但也有显著的缺点,一方面是神经网络模型比较复杂,需要更多的计算资源;另一方面,神经网络需要进行多次迭代训练才能得到较好的结果,训练时间较长,不适用于本文所使用的小型嵌入式设备。综上所述,本文所提出的多模型寻优自适应分段拟合算法,可以有效提高数据拟合的效果,以较低的硬件成本和计算量,对所设计车载式受电弓检测装置的输出误差进行补偿。

## 4 结 论

本研究的目的是为了提高所设计受电弓性能检测装置输出精度,纠正静态接触力检测误差,在最小二乘法拟合理论的基础上,提出了一种基于多模型全局寻优的分段拟合方法。

为了验证算法的有效性,通过标准拉力计配合检测终端建立了训练集和测试集对算法进行验证和分析。实验结果表明,本方法能够有效的提高受电弓性能检测装置的输出精度。通过与其他拟合方法进行对比分析,本方法提出的自适应分段方案消除了传统方法中阈值设置等干扰因素,提高了分段的准确性和可靠性。尽管拟合过程中的计算量略大于常规分段拟合方案,但最后确立的误差分段曲线,每个区间的模型不超过 2 阶,这为算法的后续应用提供了很大便利。

## 参考文献

[1] 张亚东,王雄鹰,向国成. 高铁开通对工业化进程的影响——基于劳动力流动视角[J]. 湖南师范大学社会科学学报,2022(5):77-85.  
ZHANG Y D, WANG X Y, XIANG G CH. The impact of the opening of high-speed rail on the industrialization process: Based on the perspective of

labor flow[J]. Journal of Social Sciences, Hunan Normal University, 2022(5): 77-85.

- [2] 王召杰. 钢轨绵延大道阔,山河锦绣气象新[N]. 人民铁道,2024-01-13(1).  
WANG ZH J. Rail stretch avenue broad, mountain river beautiful weather new[N]. People's Railway, 2024-01-13(1).
- [3] WANG J W, MEI G M. Effect of pantograph's main structure on the contact quality in high-speed railway[J]. Shock and Vibration, 2021(1): 1-15.
- [4] 张树峰. 城市轨道交通车辆受电弓综合性能分析与研究[D]. 上海:上海工程技术大学,2015.  
ZHANG SH F. Analysis and research on comprehensive performance of pantograph of urban rail transit vehicles[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2015.
- [5] GAO SH B. Automatic detection and monitoring system of pantograph-catenary in China's high-speed railways[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70(3): 1-12.
- [6] 石军显. 弓网静态接触力检测系统研究[D]石家庄:石家庄铁道大学, 2020.  
SHI J X. Research on static contact force detection system of bow mesh[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.
- [7] 朱伟,王敏林,董雪明. 基于自适应小波回声神经网络的光纤陀螺测角仪温度误差补偿技术[J]. 电子测量技术,2024,47(8):189-194.  
ZHU W, WANG M L, DONG X M. Temperature error compensation technology of fiber optic gyrogoniometer based on adaptive wavelet echo neural network [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(8): 189-194.
- [8] 冯云杰. 受电弓升弓特性自动测试系统的研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2022.  
FENG Y J. Research on automatic test system of rising bow characteristics of electrodoced bow [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022.
- [9] 柳贵东. 一种便携式受电弓检测装置: CN201721663179.4[P]. 2018-08-21.  
LIU G D. The invention relates to a portable pantograph detection device: CN201721663179.4 [P]. 2018-08-21.
- [10] 庞泽鹏. 便携式受电弓检测仪控制系统设计研究[D]. 北京:北京交通大学,2022.  
PANG Z P. Design and research of control system for portable pantograph detector [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

- [11] 刘付鹏,王辅宋,刘文峰等. 磁通量传感器温度补偿方法的研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(14): 95-97.  
LIU F P, WANG F S, LIU W F, et al. Research on temperature compensation method of magnetic flux sensor[J]. Engineering and Technological Research, 2023, 8(14): 95-97.
- [12] 卢志浩,雷菊阳,吴维华. 基于卡尔曼滤波的空气细颗粒物称重数据处理[J]. 电子测量技术, 2017, 40(2): 105-108.  
LU ZH H, LEI J Y, WU W H. Weighing data processing of air fine particles based on Kalman filter[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(2): 105-108.
- [13] 沈晓卫,常瑞花,周泉,等. MEMS陀螺自适应分段温度补偿方法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(8): 26-29.  
SHEN X W, CHANG R H, ZHOU Q, et al. Adaptive segmented temperature compensation method for MEMS gyro [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(8): 26-29.
- [14] 李达,郭晨霞,杨瑞峰. 基于改进 PSO-BP 算法的动态称重数据处理[J]. 电子测量技术, 2021, 44(20): 132-136.  
LI D, GUO CH X, YANG R F. Dynamic weighing data processing based on improved PSO-BP algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(20): 132-136.
- [15] 殷家伟,姜宗梁,徐凯宏. 数据拟合算法在受电弓检测误差补偿中的应用[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(2): 157-160.  
YIN J W, JIANG Z L, XU K H. Application of data fitting algorithm in pantograph detection error compensation [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(2): 157-160.
- [16] 鲍夏夏. 便携式受电弓检测仪机械测力机构动力学分析及改进[D]. 北京:北京交通大学, 2021.  
BAO X X. Dynamic analysis and improvement of mechanical force measuring mechanism of portable pantograph detector [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [17] 刘永生,李进宁,赵锦,等. 基于 BA-BP 的汽车同步器齿毂误差溯源[J]. 电子测量技术, 2024, 47(3): 77-83.  
LIU Y SH, LI J N, ZHAO J, et al. Tooth hub error tracing of automotive synchronizer based on BA-BP [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(3): 77-83.

### 作者简介

**赵二朋**, 硕士研究生, 主要研究方向为轨道交通系统的检测与控制技术。

E-mail: 1540206497@qq.com

**李志琦**, 硕士研究生, 主要研究方向为轨道列车安全检测及智能图像处理。

E-mail: 1584569074@qq.com

**牛青雨**, 硕士研究生, 主要研究方向为轨道交通系统的检测与控制技术。

E-mail: 1148753501@qq.com

**冯文钊**(通信作者), 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为图像智能处理与检测、智能监测及装置应用、轨道列车安全性监测。

E-mail: fengwenzhao@stdu.edu.cn