

# 基于 DBSCAN 与 BP 神经网络的轮速传感器故障诊断研究

郭 萃<sup>1</sup>, 田锦明<sup>1</sup>, 张 军<sup>2</sup>, 谢春旭<sup>2</sup>, 纪林海<sup>1</sup>, 何 胜<sup>1</sup>, 田昊东<sup>1</sup>, 姚林燃<sup>1</sup>

(1. 江苏海洋大学 电子工程学院, 江苏 连云港 222005;

2. 大陆汽车电子(连云港)有限公司, 江苏 连云港 222006)

**摘要:**针对工业生产时轮速传感器性能测试数据过多,难以对其故障类型进行识别的问题,设计了基于 DBSCAN 与 BP 神经网络的轮速传感器故障诊断方法。首先,根据轮速传感器工作原理以及实际测试数据分析了轮数传感器故障类型以及对应的故障数据。然后,利用 DBSCAN 对轮速传感器的性能测试数据进行异常值检测,同时建立 BP 神经网络进行训练及测试,用于对异常值对应的故障类型进行诊断与分类,并将 BP 神经网络与 GRNN 神经网络以及 PNN 神经网络的故障诊断速度以及准确率进行对比。实验结果显示:针对轮速传感器故障类型检测 BP 神经网络的速度及准确率有明显优势,该文设计的轮速传感器故障检测算法能够准确的从测试数据中提取故障数据并进行故障诊断。

**关键词:**轮速传感器;故障诊断;DBSCAN;BP 神经网络

中图分类号:TP306 + 3.4

文章编号:1000 - 0682(2024)06 - 0099 - 05

文献标识码:A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.06.019

## Study on fault diagnosis of intelligent wheel speed sensor based on DBSCAN and BP neural network

GUO Zu<sup>1</sup>, TIAN Jinming<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>2</sup>, XIE Chunxu<sup>2</sup>, JI Linhai<sup>1</sup>, HE Sheng<sup>1</sup>, TIAN Haodong<sup>1</sup>, YAO Linran<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Engineering, Jiangsu Ocean University, Jiangsu Lianyungang 222005, China;

2. Continental Automotive Electronics (Lianyungang) Co., Ltd., Jiangsu Lianyungang 222006, China)

**Abstract:** In view of the problem that the performance test data of the wheel speed sensor is difficult to identify the failure type in industrial production, the wheel speed sensor fault diagnosis method based on DBSCAN and BP neural network is designed. Firstly, according to the working principle of wheel speed sensor and the actual test data, the fault type of wheel number sensor and the corresponding fault data are analyzed. Then, DBSCAN is used to detect the performance test data of the wheel speed sensor, and to train and test the BP neural network, to diagnose and classify the fault types corresponding to the abnormal values, and to compare the fault diagnosis speed and accuracy of BP neural network with GRNN neural network and PNN neural network. The experimental results show that the wheel speed sensor fault type has obvious advantages. The wheel speed sensor fault detection algorithm designed in this paper can accurately extract the fault data from the test data and diagnose it.

**Keywords:** wheel speed sensor; thermal shock test chamber; centralized monitoring; signal filtering; functional applications

## 0 引言

汽车防抱死制动系统(ABS)是保障汽车安全行驶的关键装置。轮速传感器主要用于采集汽车轮子的转速信号,轮速传感器性能的优劣,对 ABS 系统

收稿日期:2024 - 05 - 08

第一作者:郭萃(1999—),女,硕士研究生,汉,安徽人,研究方向为智能系统及故障诊断。

是否能正常工作有着直接影响<sup>[1-2]</sup>。因此在生产轮速传感器时要在模拟的现实环境中对轮速传感器的性能进行测试。目前用于监测轮速传感器性能测试信号设备能采集与保存轮速传感器的测试数据同时在实时的信号监测时对信号出现的异常值进行报警,但无法根据信号异常值对轮速传感器进行故障诊断与分析<sup>[3-4]</sup>。由于生产测试的传感器数量巨大,若采取人工方式对轮速传感器异常数据进行故障诊断与分析,这种方式对工作人员要求较高,诊断效率和诊断精度较低。因此研究智能的轮速传感器的故障诊断方法来提高故障诊断的效率与准确率是非常有必要的。

目前用于轮速传感器故障诊断方法很少且方法过于落后。李学慧等人<sup>[5]</sup>提出在归纳轮速传感器故障模式的基础上,通过设计用于轮速传感器故障诊断的软硬件来完成对轮速传感器常见故障的诊断,但这种方法效率不高且成本过高。王玉宝等人<sup>[6]</sup>提出一种阻值式监测方法,传感器的好坏只需由阻值是否在 1.2 k $\Omega$  左右来判断,但这种方法只适用于电磁线圈式轮速传感器,且诊断效率不高。孙丽娜等人<sup>[7]</sup>提出一种基于概率神经网络 PNN 的压力调节器和轮速传感器的故障诊断方法,文中仅对轮速传感器测量结果进行分析无法具体判断轮速传感器故障类型。张翔等人<sup>[8]</sup>根据传感器实际输出和估计输出的残差信号确定目标函数及基于迭代学习的故障诊断数学模型,该方法计算量较大且在估计故障与实际故障的误差逐渐趋于 0 的过程消耗时间较长。

针对目前存在的问题,该文提出了一种基于 DBSCAN 与 BP 神经网络的轮速传感器故障诊断方法。首先利用 DBSCAN 异常值检测算法对轮速传感器性能测试的原始数据进行异常值检测,再将检测的结果作为 BP 神经网络的输入,通过故障特征训练好的 BP 神经网络预测模型对轮速传感器异常值所属的故障类型进行诊断,通过试验验证了此方法的可行性。

## 1 智能轮速传感器故障分析

### 1.1 轮数传感器工作原理及信号类型

轮速传感器是智能轮速传感器是一种用于测量车辆轮胎转速和车速的装置。这种传感器在汽车和其他交通工具中起着重要的作用,可以提供关键的数据用于监测和控制车辆的运行状态。

轮速传感器种类很多,该文主要针对两种轮速

传感器进行故障诊断研究,分别为基于调制电流脉宽协议(PWM)的智能轮数传感器与基于 AK 协议的 ABS 轮速传感器两种<sup>[9]</sup>。

基于调制电流脉宽协议(PWM)的智能轮速传感器,其使用的是高低电流的双线调制输出接口电路。调制电流脉宽度协议来表示速度和方向信号、安装气隙警告信号<sup>[10]</sup>。同时利用磁性编码盘和传感器装置来检测车轮旋转时的磁场变化,通过测量脉冲信号的频率和宽度来计算车轮的转速和车速。这种传感器通常被用于车载电脑、刹车控制系统等方面,以提供关键的数据用于监测和控制车辆的运行状态。

基于 AK 协议的 ABS 轮速传感器,是在霍尔式轮速传感器基础上引入 AK 协议来进行信号传输,它利用磁敏电阻或霍尔传感器检测车轮旋转时磁场的变化,并将这些变化转换为电压信号。除了具备传统霍尔式轮速传感器的优点外,还能为测试系统提供更加丰富的轮速信息。该传感器通过发送一个特定的脉冲信号来告诉车辆的控制系统何时该刹车或解除刹车,以达到更好的车辆稳定性和安全性。该传感器常用于 ABS(防抱死刹车系统)和牵引力控制系统中。

基于 PWM 协议的轮速传感器输出信号是二电平方波信号如图 1(a)所示,信号包含:高电流  $I_H$ 、低电流  $I_L$ 、占空比  $D$ 、频率  $f$  和高电流脉冲时间  $t(I_H = 14 \text{ mA}, I_L = 7 \text{ mA}, D = t_1/T = 50\%, f = 1/T)$ 。基于 AK 协议的轮速传感器输出信号为三电平电流信号如图 1(b)所示三电平信号包含高电流信号,其频率与车轮转速成正比,中电流信号由 9 位方波信号提供车轮的附加信号,包括气隙储备、车轮正反转等信息,低电流信号是基础电流水平,信号的参数为高电流  $I_H$ 、中电流  $I_M$ 、低电平  $I_L$ 、占空比  $D$  和频率  $f(I_H = 29 \text{ mA}, I_M = 14 \text{ mA}, I_L = 7 \text{ mA}, D = t_2/T = 50\%, f = 1/T)$ 。

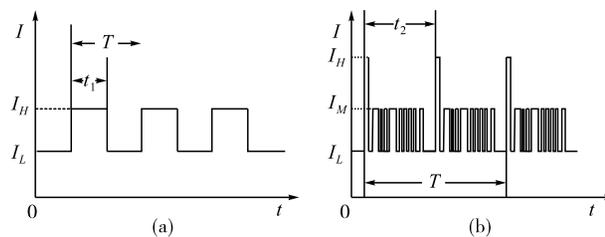


图 1 轮速传感器信号波形

### 1.2 智能轮速传感器故障特征

根据轮速传感器实际测试数据分析可将轮数传感器故障类型分为短路故障、断路故障以及占空比故障这三种类型,其中二电平与三电平信号各故障

类型所对应的特征参数如表 1 所示。

表 1 轮速传感器故障特征

传感器	特征参数				故障类型
	$I_H/\text{mA}$	$I_M/\text{mA}$	$I_L/\text{mA}$	$D/\%$	
三电平	29	14	7	50	正常运行
	0	0	0	0	断路故障
	7	7	7	0	短路故障
二电平	29	14	7	30	占空比异常
	14	/	7	50	正常运行
	0	/	0	0	断路故障
	7	/	7	0	短路故障
	14	/	7	30	占空比异常

如表 1 所示轮速传感器在正常运行时,测量的轮速传感器各特征值在理论值范围内上下波动。当轮速传感器发生故障时,根据故障类型不同对应的各特征参数也具有很大差异。因此可以根据特征参数来判断轮速传感器的故障类型。

## 2 基于 DBSCAN 与 BP 神经网络故障诊断方法

### 2.1 故障诊断算法框架设计

该文提出的故障诊断算法框架如图 2 所示。该框架分为异常值检测和故障诊断两部分。轮速传感器数据是由轮速传感器性能测试系统监测的各种参数组成,包括高电流  $I_H$ 、中电流  $I_M$ 、低电平  $I_L$ 、占空比  $D$  等。

由于轮速传感器测试时间长导致原始数据数量巨大,且其中包含大量正常数据和少量异常数据。所以在利用 BP 神经网络对轮速传感器存在的故障进行诊断前,先使用 DBSCAN 异常值检测算法将原始数据中的异常值检测出来,然后将其作为训练好的 BP 神经网络算法的输入进行故障诊断与分析,最终输出轮速传感器的故障类型。

### 2.2 DBSCAN 异常值检测算法

DBSCAN (Density - Based Spatial Clustering of Applications with Noise) 是一种基于密度的聚类算法,用于将具有相似密度的数据点划分为不同的簇,并可以识别出噪声点<sup>[11-12]</sup>。DBSCAN 异常值检测算法会将数据分为三类:核心点、边界点和噪声点。DBSCAN 通过定义邻域半径 ( $Eps$ ) 和最小邻域内的数据点数目  $m$  来描述密度。核心点是邻域内包含足够数量数据点的点,边界点是邻域内不满足密度要求但位于核心点邻域内的点,噪声点是既不是核心点也不是边界点的点。

DBSCAN 的具体工作原理如下:首先选择一个未访问的数据点  $p$ ,如果该数据点的邻域内包含至少指定数量的数据点,则将该数据点标记为核心点,并将其邻域内的数据点添加到同一个簇中。对于核心点邻域内的每个未访问的数据点,如果其邻域内包含至少指定数量的数据点,则将该数据点也标记为核心点,并将其邻域内的数据点添加到同一个簇中。重复步骤 2 和步骤 3,直到当前簇无法再添加新的数据点。选择下一个未访问的数据点,并重复步骤 2 到步骤 4,直到所有数据点都被访问。剩余未访问的数据点被标记为噪声点。

相较于孤立森林异常值检测算法,DBSCAN 不需要指定异常值在原始数据中的占比,在未知异常值占比的情况下,精确的识别原始数据中的异常值点。

### 2.3 BP 神经网络建立

BP 神经网络 (Back Propagation Neural Network) 是一种基于误差反向传播算法的人工神经网络,可以用于分类和回归等任务<sup>[13-14]</sup>。BP 神经网络由输入层、隐藏层和输出层组成。输入层接收数据输入,输出层产生输出结果,隐藏层在输入层和输出层之间进行信息处理。BP 神经网络结构如图 2 所示。

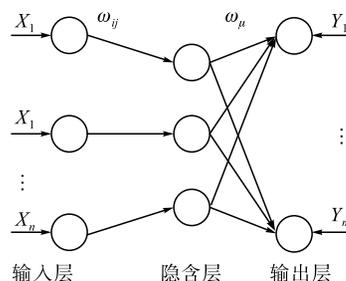


图 2 BP 神经网络结构

确定 BP 神经网络拓扑结构,将上述轮速传感器的特征参数高电流  $I_H$ 、中电流  $I_M$ 、低电平  $I_L$ 、占空比  $D$  作为特征输入,输出为故障类型。BP 神经网络结构采用输入层、隐含层、输出层的 3 层结构。隐含层节点数参照公式(1)进行选取:

$$N_h = 2N_i + 1 \quad (1)$$

式中:  $N_h$  和  $N_i$  分别为隐含层、输入层的节点数。

激活函数确定。该文选用 Sigmoid 函数作为 BP 神经网络的激活函数,其数学表达式如公式(2)所示。Sigmoid 函数可以将输入值映射到 0 到 1 之间的输出值。sigmoid 函数具有平滑、导数易于计算等特点,在 BP 神经网络中被广泛使用。

$$f(x) = 1 / (1 + \exp(-x)) \quad (2)$$

训练函数确定。该文选用 trainlm 函数作为 BP 神经网络的训练函数,trainlm 函数是一种基于 Levenberg - Marquardt 算法的训练函数,它可以快速地收敛到全局最优解,并且对初始权重值的选择不太敏感。trainlm 函数还可以自动调整学习率和动量参数,以提高训练效率和稳定性。

该文设计的 BP 神经网络的学习率设置为 0.1,目标训练误差为 0.000 001。

### 3 实验验证及分析

#### 3.1 DBSCAN 异常值检测算法验证

该文选取基于 AK 协议的三电平轮速传感器作为诊断对象。选取该传感器实际测试的一组数据,在该组数据中含有正常数据点 5000 个,且含有短路故障、断路故障以及占空比故障这 3 种故障类型数据点各 50 个。使用 DBSCAN 算法进行异常值检测,其中参数 *Eps* 设置为 0.5,参数 *m* 设置为 60,监测结果如图 3 所示,正常点和异常点分别用蓝色和红色表示的远程表示。

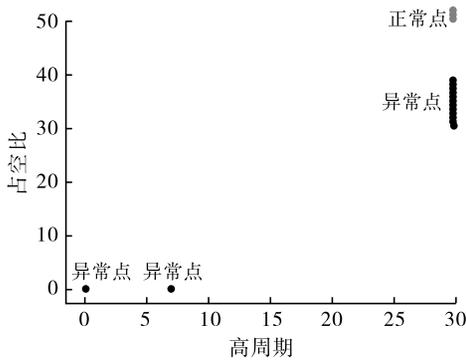


图 3 DBSCAN 异常值检测结果图

根据实验验证结果图 4 可知,DBSCAN 异常值检测结果基本与实际情况一致。当 *Esp* 参数与 *m* 值设定得当,异常值检测率能达到 100%。

#### 3.2 BP 神经网络故障诊断算法验证

为验证 BP 神经网络故障诊断算法的可行性与可靠性,在基于 AK 协议的三电平轮速传感器的实际测试数据中利用 DBSCAN 异常值检测算法提取短路故障、断路故障以及占空比故障数据样本各 40 组,用于 BP 神经网络的训练和测试,从 120 组故障样本数据的中抽取 100 组数据作为训练数据样本,剩下的 20 组数据作为测试数据样本。且将短路故障、断路故障以及占空比故障分别编码为 1、2、3。部分数据如表 2 所示。

表 2 部分故障数据样本

数据样本	特征参数				故障类型
	$I_H/mA$	$I_M/mA$	$I_L/mA$	$D/\%$	
1	6.981	14.715	29.868	38.94	3
2	0	0	0	0	2
3	6.97	6.921	6.981	0	1
4	0	0	0	0	2
5	6.995	6.99	6.964	0	1
6	6.951	6.965	6.954	0	1
7	7	14.742	29.844	31.35	3
8	6.936	14.79	29.834	32.62	3
9	6.913	6.97	6.981	0	1
10	0	0	0	0	2

利用 BP 神经网络对以上数据进行故障诊断,并选择另外两种神经网络算法 GRNN 神经网络与 PNN 神经网络算法作为对比。

通过 MATLAB 软件对 BP 神经网络故障诊断模型和 GRNN 神经网络故障诊断模型与 PNN 神经网络故障诊断模型进行验证。其中 BP 神经网络的故障分类的训练结果与测试结果如图 4 所示。

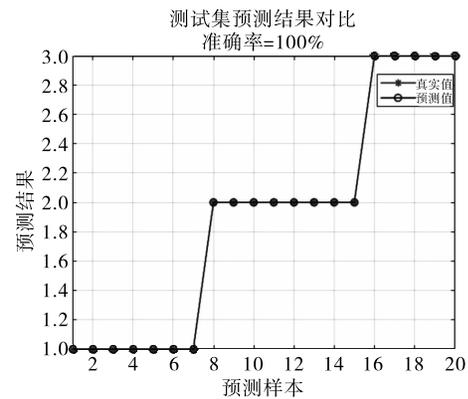
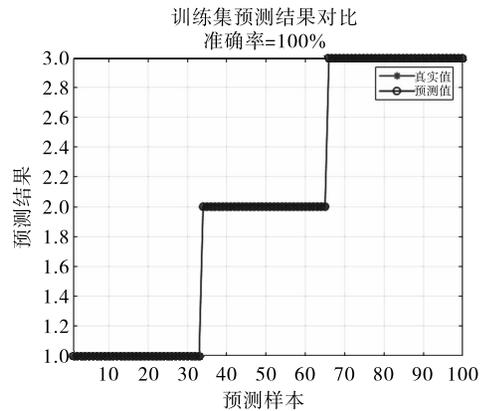


图 4 BP 神经网络故障分类结果

由图 4 的训练结果与测试结果可看出 BP 神经网络能够准确的诊断出轮速传感器故障类型。

正确率是判断故障诊断方法精度的重要评价指

标,正确率越高,方法精度越高。该文通过改变每次用于训练的样本的特征值个数,对比这3种神经网络算法在10种不同的样本特征值的组合下的故障诊断的正确率,10次模型测试结果正确率对比如图5所示。

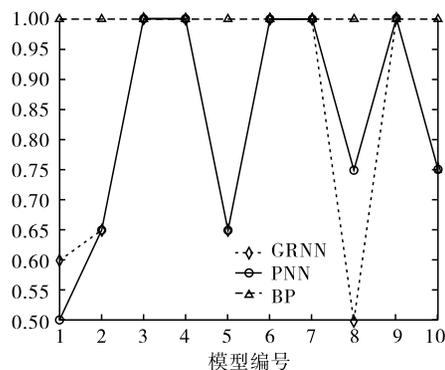


图5 BP与GRNN和PNN的模型测试对比图

由图5可知,BP神经网络故障诊断模型与GRNN和PNN神经网络故障诊断模型相比,BP神经网络故障诊断模型10次测试的平均正确率为100%,而GRNN与PNN神经网络故障诊断模型10次测试的平均正确率分别为83%和84%,BP神经网络故障诊断模型的诊断精度与性能明显优于GRNN和PNN,能够有效诊断出轮速传感器的故障类型。

#### 4 结语

为解决智能轮速传感器故障诊断的问题,该文通过DBSCAN异常数据检测算法从轮速传感器原始测试数据中检测出异常数据,其中包含了轮速传感器故障工作的特征值,并将其作为BP神经网络的输入样本,用BP神经网络诊断轮速传感器故障类型。实验证明,BP神经网络故障诊断准确率为100%,即基于DBSCAN与BP神经网络的轮速传感器故障诊断方法能够快速精确的诊断出智能轮速传感器的故障类型。

#### 参考文献:

[1] 郑玲玲,段春光,尹海.基于ABS轮速传感器的信号模

拟系统研究与应用[J].实验室研究与探索,2019,38(8):92-95+118.

- [2] 孙丽娜,王佳庆,黄永红.基于PNN的汽车ABS系统中压力调节器和轮速传感器的故障诊断[J].计算机测量与控制,2020,28(4):16-21.
- [3] 王辉,闵永军,周菊.霍尔式轮速传感器永磁体磁场均匀性测量方法研究[J].仪表技术与传感器,2020(5):14-17.
- [4] 田锦明,黄超,纪林海,等.基于LabVIEW的智能轮速传感器测试系统设计[J].电子测量技术,2022,45(1):153-158.
- [5] 李学慧,丁能根,冯永明.ABS磁电式轮速传感器故障诊断[J].机械工程师,2007(3):120-122.
- [6] 王玉宝.ABS系统轮速传感器故障判断及检测方法[J].汽车电器,2004(6):48-49.
- [7] 孙丽娜,王佳庆,黄永红.基于PNN的汽车ABS系统中压力调节器和轮速传感器的故障诊断[J].计算机测量与控制,2020,28(4):16-21.
- [8] 张翔,温熙圆,曹宏发,等.基于迭代学习的速度传感器故障诊断研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(11):3006-3012.
- [9] 田锦明,黄超,纪林海,等.基于LabVIEW的智能轮速传感器测试系统设计[J].电子测量技术,2022,45(1):153-158.
- [10] 王杰杰,龚光剑.基于STC微控制器的DC电机系统设计[J].电子制作,2023,31(19):3-7.
- [11] 贺玉海,周庆琨,程焱晟,等.基于改进K-Medoids的组合聚类算法及异常值检测研究[J].大连理工大学学报,2022,62(4):403-410.
- [12] 闫亚男,韩长霖,陈小松,等.融合时间序列特性的水电遥测数据清洗优化框架[J].水力发电,2021,47(11):79-83+95.
- [13] 司少剑,曾劲松,田钊,等.BP神经网络在人体摔倒趋势识别中的应用[J].机械设计与制造,2023,386(4):167-171.
- [14] 王超,杨青祥,齐天玉,等.基于机器视觉和BP神经网络的单车荷载识别[J].华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(8):53-59.