Wear Detection of Dual Axle Steering of Automotive Tires Based on Magnetic Adsorption Sensors*

LI Jing[1*], ZHENG Jianxiao[2]

(1.College of Transportation, Shaanxi Institute of Mechatronic Technology, Baoji Shaanxi 721001, China;
2.School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China)

Abstract: To improve the stability and driving safety of automobiles, a dual axle steering wear detection method for automotive tires based on magnetic adsorption sensors is proposed. The magnetic adsorption sensor is fixed at the connection location between the tire and the dual axle to collect the adhesion coefficient between the car tire and the ground, and the magnetic field contour extraction algorithm is used to extract the contour or boundary information of the magnetic field. Then, the magnetic field strength is measured using a magnetometer and the data are transmitted to a computer to scan the friction contact surface between the tire and the ground, generating tire wear images. The improved threshold method is used to extract the tire wear characteristics in the image to show the tread details. A dual axle steering wear detection model is created for automotive tires using backpropagation neural networks, and wear detection results are outputed by solving the model. The simulation results show that the proposed method has a relatively low wear error detection rate, with a maximum error detection rate of 1.3%. The detection time is less than 0.36 s, and the highest IoU value is 98%, achieving high-quality dual axle steering wear detection of automotive tires.

Key words: magnetic adsorption sensor; wear detection; BP neural network; automobile tire; dual axle steering
EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.02.016

基于磁吸附式传感器的汽车轮胎双轴转向磨损检测*

李 靖[1*], 郑建校[2]

(1.陕西机电职业技术学院交通运输学院, 陕西 宝鸡 721001; 2.西安建筑科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 为提高汽车运行稳定性与驾驶安全性, 提出基于磁吸附式传感器的汽车轮胎双轴转向磨损检测方法。将磁吸附式传感器固定于轮胎与双轴连接处, 采集汽车轮胎与地面附着系数; 并利用磁场轮廓提取算法, 提取磁场的轮廓或边界信息。再通过磁力计测量磁场强度, 并将数据传输给计算机对轮胎与地面摩擦接触面进行扫描, 生成轮胎磨损图像。利用高斯函数抑制汽车轮胎图像噪声, 采用改进阈值法提取图像中轮胎的磨损特征; 运用反向传播神经网络创建汽车轮胎双轴转向磨损检测模型, 通过求解模型, 输出磨损检测结果。仿真结果表明, 所提方法磨损误检率较小, 最大误检率为 1.3%; 检测时间低于 0.36 s; IoU 值最高为 98%, 可以实现高质量的汽车轮胎双轴转向磨损检测。

关键词: 磁吸附式传感器; 磨损检测; BP 神经网络; 汽车轮胎; 双轴转向
中图分类号: U463 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)02-0316-06

双轴转向是指车辆的前轮和后轮均具有转向能力, 可以独立或协调地操作以改变车辆的方向和行驶轨迹。轮胎[1-2]是承载车辆重量和提供行驶动力的重要部件。汽车轮胎双轴转向磨损会影响车辆的行驶稳定性、转向性能、制动性能和燃油经济性。及时有效地检测轮胎双轴转向磨损变化, 对增强轮胎使用寿命、保证车辆正常行驶具有较高的现实意义。

针对轮胎磨损检测[3], 相关学者进行了广泛研究。如储昊昀等[4]利用三轴加速度传感器收集轮胎加速度波形, 运用凯撒最大化正态方差法分析加速度波形特征, 提取并筛选波形特征值构建数据集, 采用神经网络训练特征值数据, 完成轮胎磨损检测。张一兵等[5]利用高斯滤波方法处理磨损表面, 通过多重分形去趋势波动分析算法推算磨损表面高频信息, 使用主成分分析法提取磨损特征, 运用 *K*-Means 聚类、支持向量机等策略识别检测目标磨损程度。Sivamani 等[6]利用多状态卷积神经网络来分析轮胎的磨损和耐久性能。通过卷积函数从输入图像中识

项目来源: 陕西省职教学会 2022 年度教育教学改革研究课题项目(2022SZX451); 2021 年度陕西高等职业教育教学改革研究项目(21GY019)
收稿日期: 2023-05-24 **修改日期**: 2023-07-07

别特征图,子采样利用卷积函数来产生具有完全连接的网络的输出。采用二次曲面对具有多个卷积层的图像进行预处理,完成轮胎磨损检测。但以上方法操作成本较高,过程复杂,很难实现广泛应用。

本文提出一种基于磁吸附式传感器的汽车轮胎双轴转向磨损检测方法。通过磁场检测并分析汽车轮胎表面磁性材料的磁场特性,实现磨损的检测和定位。通过磁吸附的方式固定在被检测汽车轮胎上,利用磁场激发被检测汽车轮胎表面上磁性材料的磁特性,使传感器测得的汽车轮胎与地面附着系数发生的变化。然后,根据相应的算法来获取附着系数,并将其转化为可视化图像,利用高斯函数抑制汽车轮胎图像噪声,采用改进阈值法提取图像中轮胎的磨损特征,展现胎面细节信息;运用反向传播神经网络创建汽车轮胎双轴转向磨损检测模型,通过求解模型,输出磨损检测结果,实现汽车轮胎双轴转向磨损检测。

1　磁吸附式传感器下汽车轮胎与地面附着系数采集

1.1　汽车轮胎的结构和材料

在汽车的双轴配置中,前轴和后轴的轮胎可能具有不同的要求和规格。为了保证研究的一致性,本文选取对某品牌的子午线汽车轮胎进行研究,轮胎的结构如图 1 所示。

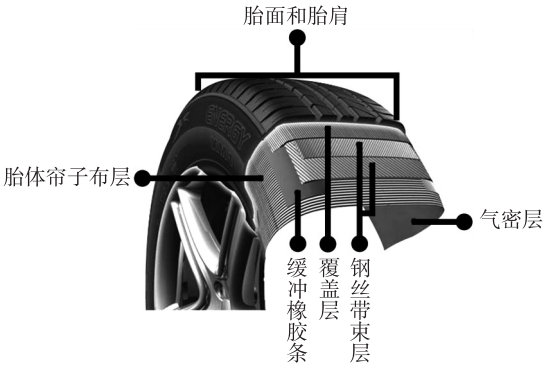


图 1　轮胎结构

子午线轮胎由胎面、胎体、胎侧、带束层、胎圈、气密层六个主要部分组成。胎体和带束层所用帘线材料为全钢丝;轮胎的胎面采用了高质量的橡胶材料和特殊的纤维增强层。

1.2　附着系数采集

在车轮运动过程中,磁性材料会对轮胎表面的磁场产生影响,导致磁场信号的变化。利用磁吸附式传感器[7]采集轮胎和地面附着信息对车轮轮胎表面的磁场进行检测,可以明确当前汽车轮胎在双轴转向过程中是否产生附着系数。

用螺丝将磁性底座固定在轮胎与双轴连接处,将磁吸附式传感器放置在磁性底座上。利用传感器提供的信号数据完成轮胎制动时[8]的数据采集。固定位置如图 2 所示。

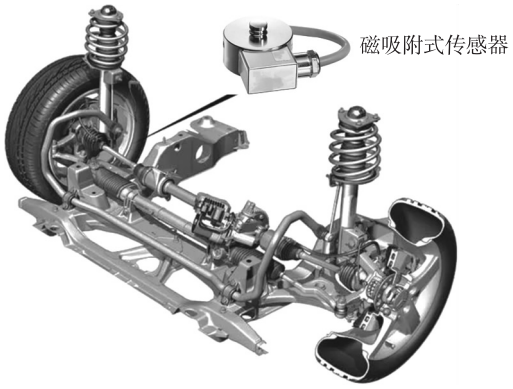


图 2　磁吸附式传感器固定位置

不考虑空气阻力和滚动阻力,假设在最高目标制动力 D_m 下,磁吸附式传感器感知的踏板行程是 J_1[9],则踏板位移和传感器之间的函数关系为:

$$D_m=\frac{\phi_b(D_{xb}+C_\mu)}{H} \tag{1}$$

$$D_v=\begin{cases}0 & J_p\leqslant J_z\\ l_1(J_p-J_z) & J_z<J_p\leqslant J_1\\ D_m & J_1<J_p\end{cases} \tag{2}$$

式中:ϕ_b 表示附着系数;C_μ 表示制动力矩;D_{xb} 表示地面制动力;H 表示轮胎滑移率;l_1 表示感知常数;D_v 表示制动力速率;J_z 表示踏板自由行程;J_p 表示踏板行程临界值。

假设电压信号是 U,则将其定义为:

$$U=l_0J_pD_v \tag{3}$$

式中:l_0 表示非零感知常数。

运用式(2)、式(3)可获得式(4)所示的车轮轮胎表面磁场采集结果:

$$\gamma_{v1}=\begin{cases}0 & U\leqslant l_0J_z\\ \dfrac{l_1}{l_0}U-l_1J_z & l_0J_z<U\leqslant l_0J_1\\ D_m & l_0J_1<U\end{cases} \tag{4}$$

式中:车轮轮胎表面磁场采集结果 γ_{v1} 即为地面附着系数。

2　轮胎磨损传感信号检测

轮胎与地面附着系数与轮胎磨损特征之间存在密切的关系。轮胎磨损后,会使地面附着系数变小,从而会影响车辆的车辆性能和行驶稳定性。由于轮胎与地面附着系数无法直观地判断汽车轮胎磨损情

况,为了便于分析,本文利用磁场轮廓提取算法,从采集的传感信号 γ_{v1}[10] 中提取磁场的轮廓或边界信息,以显示磁场的形状和特征。在此基础上,通过磁力计测量磁场强度,并将测量得到的磁场强度数据传输给计算机中。通过扫描轮胎与地面摩擦接触面生成轮胎磨损图像。以该图像为基础,从特征提取和构建磨损检测模型两个方面实现汽车轮胎双轴转向磨损检测。

2.1 轮胎磨损特征提取

为了提高磨损检测精度,通过高斯滤波器[11]对生成轮胎磨损图像进行平滑处理。高斯滤波器为一种线性滤波器,高斯函数满足正态分布,可有效抑制噪声。将具备去噪能力的二维高斯函数记作:

$$L(x,y)=\frac{\gamma_{v1}}{2\pi}\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\eta^2}\right) \tag{5}$$

式中:(x,y)为图像去噪的像素点位置,η 表示高斯系数。

对轮胎磨损图像进行去噪处理后,利用改进阈值法[12-13]提取轮胎磨损图像中的轮胎磨损特征。轮胎表面纹理为花纹块与花纹槽的组合,呈不规则纹理,纹理之间的边界互相叠加很难划分。为此,通过改进阈值法使分割轮胎整体轮廓。使用原始阈值 c 将图像分割成两阶灰度图像,记作:

$$f(x,y)=\begin{cases}1 & L(x,y)\geqslant c\\ 0 & L(x,y)<c\end{cases} \tag{6}$$

式中:$f(x,y)$是图像(x,y)处的灰度值。

方差[14]是灰度分布匀称的一种评估指标,方差值越高证明图像两部分的区别越大。在此前提下,计算方差 $\delta^2(t)$:

$$\delta^2(t)=\frac{\gamma_1(t)\gamma_2(t)[o_1(t)-o_2(t)]^2}{f(x,y)} \tag{7}$$

式中:$\gamma_1(t)$、$\gamma_2(t)$依次表示不同像素对应的数据集;$o_1(t)$、$o_2(t)$表示不同像素集全部灰度值的均值。

阈值分割一般都只使用像元灰度数据,对细节较多的图像很难得到满意结果。代入区域标注算法[15]完成更细致的特征提取任务,即二次分割。把图像像素划分为网格,使用式(7)推算出像素单元 t 的灰度差最大值 $M(t)$,再遍历 t 与周边线性偏移量涵盖的像素单元,统计自身所属边界并进行标记,实现磨损特征提取。

$$M(t)=\delta^2(t)+\max(p_1Q-p_2R) \tag{8}$$

式中:Q、R 分别表示分割前后 t 对应的两个图像函数;p_1、p_2 依次表示相对应的权重值。

2.2 磨损检测模型

在提取汽车轮胎磨损特征后,为了更加准确地获取磨损检测结果,利用 BP 神经网络[16-19]构建磨损检测模型,通过模型的训练学习,更好地实现汽车轮胎双轴转向磨损检测。

为杜绝汽车轮胎沟槽位置处于分界线,产生沟槽交叠现象,把胎冠线设定为沟槽处的分割模块,模块数量为 5。设置每个沟槽中心线和模块的边界距离是 k,利用式(9)得到沟槽在不同模块中的方位:

$$Z'=\frac{2\varphi r_u}{z}+k(R-L) \tag{9}$$

式中:r_u 表示模块的 1/2 长度;L、R 依次表示胎冠线沟槽处的左、右端点坐标;z 表示模块中心方位坐标;Z'表示沟槽中心坐标;φ 表示取值范围在[-0.6,0.6]的随机值。

为增强磨损监测识别能力,归一化处理[20]每条胎冠线数据,让胎冠线坐标范围在[-0.6,0.6]之间,归一化解析式为:

$$X'=Z'\frac{X_i-A_W}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{10}$$

式中:X'表示归一化后的信息;X_i 表示胎冠线的第 i 个坐标数据;A_W 表示胎冠线坐标数据中值;$X_{\max}$、$X_{\min}$依次表示胎冠线坐标数据最高值与最低值。

以 BP 神经网络架构[21]作为轮胎双轴转向磨损检测的模型,如式(11)所示:

$$\omega=X'-\frac{w^l\zeta^l(\tau^{l-1})}{b^l}-O(y,y') \tag{11}$$

式中:ζ^l 表示计算误差;w^l 表示权重;(τ^{l-1})表示误差临界值;b^l 表示偏置;$O(y,y')$表示损失函数。

2.3 模型求解

利用特征提取结果 $M(t)$ 和磨损检测模型 ω 可以实现轮胎磨损检测。将 $M(t)$ 代入 ω 中进行模型求解,过程如下:

步骤一:把轮胎拟作橡皮,在轮胎和地面的接触面积内截取其中的一个微块,让此微块上的压力是 $P(x,y)$,再通过胎面移动生成的剪切力 $F(x,y)$ 获得滑移量 $k(x,y)$,把此微块摩擦损耗能量记作:

$$E(x,y)=\frac{M(t)[F(x,y)\times k(x,y)]}{N_hP(x,y)} \tag{12}$$

式中:N_h 表示轮胎橡胶特征与路面的决定系数。

则胎面单元在接地面积中的磨损值是:

$$g_{i,j}=E(x,y)\left|F_{x,i,j}v_{x,i,j}\right|+\left|F_{y,i,j}v_{y,i,j}\right| \tag{13}$$

式中:$F_{x,i,j}$、$F_{y,i,j}$依次表示纵向与侧向的剪切力;$v_{x,i,j}$、$v_{y,i,j}$依次表示纵向与侧向的滑移速率。

步骤二:通过磨损定律获得当前汽车轮胎双轴转向状态下的磨损质量,表示为:

$$m_{i,j}=r_1\left[\frac{g_{i,j}}{\Delta x_{i,j}\times\Delta y_{i,j}}\right]^{r_2} \tag{14}$$

式中:$\Delta x_{i,j}$、$\Delta y_{i,j}$依次表示接触地面区域胎面单元长度与宽度;r_1、r_2 均为常数,表示在指定气温下胎面材料参数与路面参数。

倘若轮胎接触面积为固定的,仅考虑周期性就能推算局部质量损失,则轮胎轴向磨损质量计算公式为:

$$O_m=\sum_{h_e} m_{i,j}(h_e)\Delta y_{i,j}v_{x,i,j}(h_e)\,\mathrm{d}t \tag{15}$$

式中:dt 表示积分步长;h_e 表示接地印记周向胎面单元纵向编码。

步骤三:通过汽车轮胎双轴转向下的局部磨损质量,就能对比出轮胎在宽度方向不同的磨损值,明确轮胎磨损深度,实现高精度磨损检测。求解公式为:

$$I_m=\omega\{O_m/[J_s\vartheta\times 2M(t)P_e\times b_n]\} \tag{16}$$

式中:J_s 表示汽车驾驶距离;ϑ 表示胎面复合物密度;P 表示轮胎有效半径;b_n 表示轮胎接地宽度。

根据上述步骤,在利用磁吸附式传感器采集汽车轮胎与地面之间的附着系数基础上,提取轮胎磨损特征,并将其作为 BP 神经网络磨损检测模型的输入,通过模型求解实现汽车轮胎双轴转向磨损检测。BP 神经网络实现磨损检测的示意图如图 3 所示。

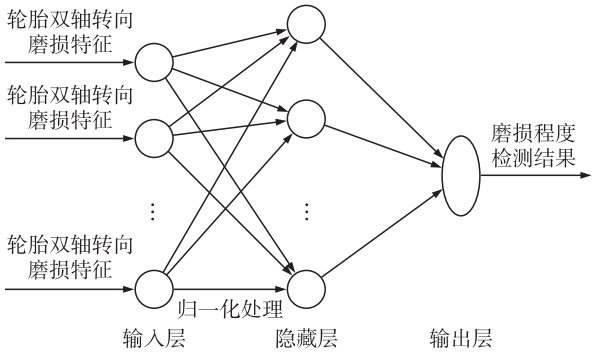


图 3　BP 神经网络实现磨损检测的示意图

3　仿真分析

为了验证所提方法的有效性,使用双轴转向系统中的轮胎作为仿真对象进行分析。将文献[4]加速度波形分析法和文献[6]多状态卷积神经网络作为对照目标进行仿真分析,仿真被分成主观与客观两部分。磁吸附式传感器和 BP 神经网络相关的参数设置如表 1 所示。

3.1　仿真设置

在 Pycharm 编译环境下完成汽车轮胎双轴转向磨损检测,使用两个磁吸附式传感器模拟轮胎的双轴转向系统。将这两个传感器分别放置在模拟的前轮和后轮上。根据双轴转向系统的运动规律,生成模拟的磁场强度数据,如表 2 所示。

表 1　参数设置

参数名称		参数值
磁吸附式传感器	采样频率	100 Hz
	测量范围	±10 mT
	分辨率	0.1 mT
BP 神经网络	学习率	0.1
	迭代次数	1 000

表 2　双轴转向的磁场强度数据

时间/s	前轮磁场强度/mT	后轮磁场强度/mT
0.0	1.2	0.8
0.1	1.3	0.7
0.2	1.5	0.6

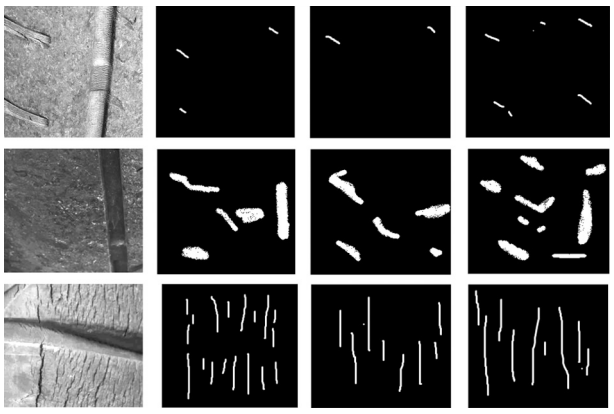
依照轮胎外观质量标准的胎面磨损检测标准,将轮胎磨损程度的划分结果记作表 3。测量目标为三个 205/55R16 型号轮胎,且三个轮胎胎面磨损程度各不相同。

表 3　汽车轮胎胎面磨损依据与对应措施

轮胎编号	磨损水平	评估标准	对应措施
1	轻度磨损	花纹深度高于 3.6 mm	定期检查
2	中度磨损	花纹深度为 1.7 mm~3.6 mm	建议更换轮胎
3	重度磨损	花纹深度低于 1.7 mm	需要更换轮胎

3.2　主观仿真分析

主观分析中,既要检测轮胎磨损的方位形态,还要保存相应的细节信息,从语义感知和纹理感知两个层面完成磨损检测工作。分别利用所提方法、加速度波形分析法和多状态卷积神经网络对 3 个轮胎胎面进行检测,仿真结果如图 4 所示。



(a) 样本图像　(b) 所提方法　(c) 加速度波形分析法　(d) 多状态卷积神经网络

图 4　三种方法汽车轮胎磨损检测结果对比

图 4 从上至下依次为轻度、中度、重度轮胎磨损示意图。观察图 4 可知,加速度波形分析法对胎面磨损形状及细节纹理的检测敏感度较低,仅能找出部分磨损具体位置;多状态卷积神经网络具备较强的信息捕获能力,但在复杂背景纹理的汽车轮胎图像中存在较多误检,实用性有待提升。和两种对比方法相比,所提方法可有效提升磨损位置与细节检测的精准度,对磨损边缘细节更为敏感,检测效果较好。这是因为所提方法使用磁吸附式传感器采集轮胎有关数据,增强了检测结果精度。

3.3 客观仿真分析

客观分析采用误检率、检测时间与交并比三个指标进行性能对比。

①误检率分析:

误检率即判断错误数据除以全部检测数据的百分比,误检率越小,检测精度越优。以重度磨损图像轮胎花纹沟槽磨损检测为例,依照像素点邻域中的梯度变化规律明确沟槽点,取相同水平扫描线,设定像素值均为 1.5,从上到下扫描整张图像,每扫描一行进行以下计算:利用扫描线逐行扫描待计算图像,提取非零像素点,推算各非零像素点左右邻域的梯度值;评估非零像素点左右邻域梯度值是否异常,梯度绝对值总和是否高于设定阈值,如果高于阈值认定此像素点为轮胎沟槽磨损位置,反之丢弃。每计算一个非零点,就把扫描线相对位置区域设为 0,后续不再重复计算此区域。

将阈值作为变量,分析不同阈值下三种方法的轮胎磨损检测误检率输出情况,结果如图 5 所示。

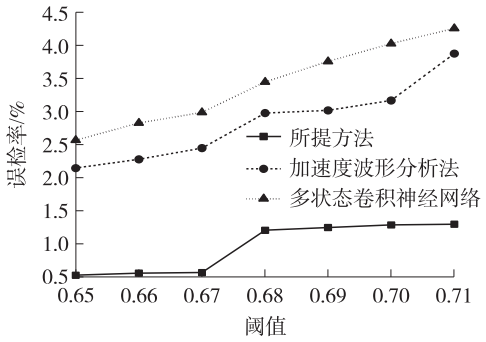


图 5 轮胎花纹沟槽磨损误检率对比

从图 5 内容看出,伴随阈值的持续变化,所提方法磨损误检率始终为最小,最大误检率为 1.3%。加速度波形分析法和多状态卷积神经网络在计算初期的误检率偏高,证明所提方法的磨损检测性能优于两种对比方法。出现此种现象的原因为:所提方法使用具备大规模并行计算的 BP 神经网络组建汽车轮胎磨损检测模型,极大提升了磨损检测可靠性。

②检测时间分析:

检测时间是指三种方法对目标样本检测其磨损状态所用的时间长度。检测时间越短,表明对应方法可以最越速地判断轮胎磨损情况,能最大程度地保障车辆的行车安全。图 6 所示为不同地面附着系数下三种方法轮胎磨损检测的时间对比。

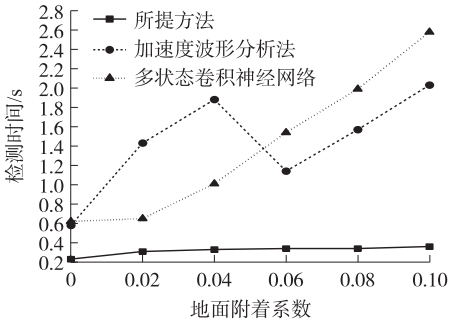


图 6 轮胎花纹沟槽磨损检测时间对比

从图 6 看出,加速度波形分析法和多状态卷积神经网络检测时间高于 0.58 s,而所提方法在轮胎花纹沟槽磨损检测时间占据较大优势,在地面附着系数较高的状况下也能保证检测及时性,检测时间低于 0.36 s,可以辅助行车司机或维修人员第一时间明确轮胎磨损情况,避免造成更大的经济损失。

③交并比分析:

交并比表示生成的候选框和原始标记框交集与并集的比例,衡量磨损检测方位与大小的准确性。设 B_r 是检测获得的磨损区域,A_t 是标记的实际磨损区域,则交并比运算公式为:

$$\mathrm{IoU}=I_m\frac{\mathrm{area}(B_r\cap A_t)}{\mathrm{area}(B_r\cup A_t)} \tag{17}$$

式中:area 表示区域面积,即涵盖图像的像素数量。

所提方法、加速度波形分析法和多状态卷积神经网络在不同归一化系数下的 IoU 对比结果如图 7 所示。

从图 7 看出,所提方法、加速度波形分析法和多状态卷积神经网络在归一化系数为 6 时的 IoU 值最高,分别为 98%、92.7% 和 94.9%。其中,所提方法对汽车轮胎双轴转向磨损检测的 IoU 值最高,表示

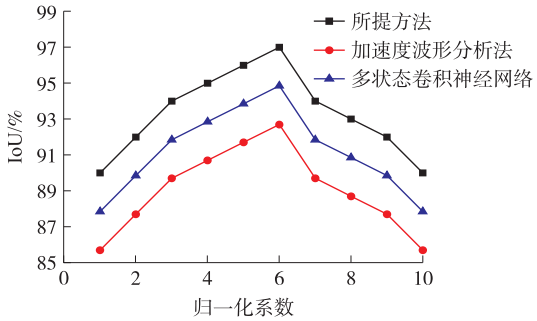


图 7 IoU 对比结果

预测框更加准确地覆盖了磨损位置,即汽车轮胎双轴转向磨损检测精度最高。其主要原因是本文利用磁场轮廓提取算法,提取磁场的轮廓或边界信息,并通过磁力计测量磁场强度,对轮胎与地面摩擦接触面进行扫描和成像。并通过高斯滤波器对生成轮胎磨损图像进行平滑处理,提高了图像的精准度,可以直观看出轮胎磨损的程度。

4　结论

为实时掌握汽车轮胎双轴转向过程中的磨损程度,实现高质量轮胎全周期寿命管理,提出一种基于磁吸附式传感器的汽车轮胎双轴转向磨损检测方法。所提方法可自主完成轮胎胎面磨损检测,且磨损误检率较小、检测时间较低、IoU 值较高,表明所提方法的检测精度与效率均满足日常检测需求,所提方法可以为汽车轮胎磨损检测提供一种智能且高效的检测模式,具备广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 徐向阳,李光远,陶斯友,等. 四轮独立驱动电动汽车轮胎纵横向滑移能耗仿真分析[J]. 机械工程学报,2021,57(4):92-102.

[2] 付宏勋,赵强,刚宪约,等. 智能轮胎状态信息估算研究综述与展望[J]. 科学技术与工程,2022,22(2):463-470.

[3] 许磊,庞茂. 基于结构光的轮胎花纹深度测量系统研究[J]. 激光杂志,2022,43(3):179-183.

[4] 储昊昀,张峰瑞,张越,等. 基于加速度波形分析的轮胎运行特征提取和磨损检测方法[J]. 汽车技术,2023(1):44-48.

[5] 张一兵,陈聪,刘立鹏,等. 基于多重分形去趋势波动分析算法的表面磨损形式特征研究[J]. 润滑与密封,2022,47(2):15-21.

[6] Sivamani C,Rajeswari M,Julie E G,et al. Tyre Inspection through Multi-State Convolutional Neural Networks[J]. Intelligent Automation and Soft Computing, 2021, 27(1):013705.

[7] 王立乾,胡忠强,关蒙萌,等. 基于巨磁阻效应的磁场传感器研究进展[J]. 仪表技术与传感器,2021(12):1-12,17.

[8] 江治东,郑敏毅,张农,等. 基于车辆制动后期的纵向振动控制[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(6):731-737.

[9] 刘金刚,肖培杰,傅兵,等. 踏板耦合式电动助力器踏板脚感抖动抑制研究[J]. 振动与冲击,2021,40(18):221-227.

[10] 王海,刘明亮,蔡英凤,等. 基于激光雷达与毫米波雷达融合的车辆目标检测算法[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2021,42(4):389-394.

[11] 唐超,左文涛,李小飞. 结合修剪均值与高斯加权中值滤波的图像去噪算法[J]. 计算机工程,2021,47(9):210-216.

[12] 郭保苏,韩天杰,张宇,等. 基于带阈值模块一维残差网络的刀具磨损监测方法[J]. 计量学报,2022,43(4):501-506.

[13] Gill H S,Khehra B S. Apple Image Segmentation Using Teacher Learner Based Optimization Based Minimum Cross Entropy Thresholding[J]. Multimedia Tools and Applications,2022,81(8):11005-11026.

[14] 任向阳,朱晓东,王禹博,等. 基于 BM3D 的图像噪声方差估计方法[J]. 郑州大学学报(理学版),2021,53(3):56-64.

[15] 汪理,李光辉,陈吹信. 融合显著信息的白色污染图像自动标注算法[J]. 计算机仿真,2021,38(7):165-169.

[16] 陈玉坤,管会生,周磊,等. 基于 BP 神经网络的盘形滚刀磨损预测研究[J]. 现代隧道技术,2021,58(5):78-84.

[17] 李孟奇,屈美娇,何卫锋,等. 基于 BP 神经网络的力学行为模型构建方法[J]. 兵器材料科学与工程,2022,45(3):1-7.

[18] 王宸,张军朝,许并社,等. 基于光效和 BP 神经网络的 LED 结温预测研究[J]. 电子器件,2024,47(2):496-501.

[19] 张安莉,谢 檬,李 翔,等. 基于 BP 神经网络的太阳能路灯 SOC 预测[J]. 电子器件,2024,47(5):1227-1232.

[20] Konovalenko I A,Kokhan V V,Nikolaev D P. Optimal Affine Image Normalization Approach for Optical Character Recognition[J]. Computer Optics,2021,45(1):90-100.

[21] Yue X,Ma G,Liu F,et al. Research on Image Classification Method of Strip Steel Surface Defects Based on Improved Bat Algorithm Optimized BP Neural Network[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology,2021,41(1):1509-1521.

李　靖(1976—),男,中共党员,陕西省职业教育教学名师,省级技能大赛优秀辅导教师,副教授、电工技师、上汽通用汽车铜级技师,主持多项国家级、省级课题,发表多篇学术论文,主编或参编多本教材,多次执裁省市级大赛,184906300@qq.com;

郑建校(1975—),男,汉族,陕西岐山人,工学博士,副教授,研究方向:新能源汽车。