烧结机台车车轮踏面缺陷检测系统设计与实现

袁志龙，陈 波，王月明
(内蒙古科技大学 信息工程学院，内蒙古 包头 014010)

摘要： 烧结机台车车轮踏面缺陷有时会造成烧结机台车车轮发生卡顿、停滞、脱轨等故障，进而造成烧结机台车发生顿车现象，严重时甚至会导致生产安全事故，为避免此类问题，本文使用 YOLOv5 检测算法进行烧结机台车车轮踏面缺陷检测，并在此基础上设计了车轮踏面缺陷自动检测系统，当系统检测到车轮踏面发生缺陷时则启动报警并且通过微信消息推送车轮踏面的缺陷情况，为工程师及时维护提供技术保障。测试结果表明：该检测系统对车轮踏面缺陷的查全率为 92% 以上，查准率为 100%，系统漏检的车轮踏面缺陷目标较小，基本不影响烧结机台车车轮正常运行。该系统可以应用于烧结机台车车轮踏面缺陷检测。

关键词： 烧结机；台车；YOLOv5 算法；车轮踏面；缺陷；检测系统
中图分类号： TF046.4；TF321.1；U279 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)03－0070－06
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.03.042

Design and implementation of defect detection system for tire tread of sintering machine trolley

YUAN Zhilong, CHEN Bo, WANG Yueming
(School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: The defect of the tire tread of sintering machine trolley sometimes causes the tires of sintering machine trolley to lag, stagnation, derailment and other failures, and then causes stall phenomenon of the sintering machine trolley, which sometimes even leads to production safety accidents. In order to avoid such problems, YOLOv5 detection algorithm is used for defect detection of sintering machine trolley tire tread, and, on this basis, automatic detection system for tire tread defect is designed. When the defect of the tire tread is detected, the system will start the alarm and push the defect of the tire tread through WeChat message, providing technical support for engineers to maintain in time. The results show that the detection system has a recall rate of more than 92% and a precision ratio of 100% for tire tread defect, and the target of tire tread defect missed by the system is quite small, which basically does not affect the normal operation of the sintering machine trolley tires. The system can be applied to the detection of tire tread defect in sintering machine trolley.

Key words: sintering machine; trolley; YOLOv5 algorithm; tire tread; defect; detection system

烧结系统机械故障中有 30% 以上是由于烧结机台车运行故障造成的[1]。烧结机在运行过程中容易出现“顿车”现象，也称烧结机“蠕动”，即烧结机台车车轮在轨道上运转不连续，存在“走走停停”的现象[2]。造成车轮踏面缺陷的因素包括轴重、车速、轨面干湿状况[3]，台车制动力过大、制动缓解不良[4]、轮对车轮直径差值[5]。轮对尤其是车轮踏面的机械状态直接影响着台车的运行

收稿日期： 2021－12－30；**修回日期：** 2022－03－24
基金项目： 内蒙古自然科学基金资助项目(2020MS06008)；内蒙古自治区关键技术攻关项目(2021GG0045)
作者简介： 袁志龙(1993—)，男，硕士研究生，从事数字图像处理、机器视觉等方面的研究。
通信作者： 王月明(1978—)，男，博士，教授，从事智能信息处理技术方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

安全[6]。因此对车轮踏面进行自动化、智能化检测已成为钢铁公司非常重要的技术需求。

针对烧结机台车车轮检测，前人尝试了多种方法：唐凌剑等[7]设计了一种烧结机台车车轮自动检测报警装置，包括传动系统和报警系统，能够检测出烧结机台车车轮的状态；韩明明等[8]设计了一种烧结机台车车轮状态检测装置，通过压力传感器预测车轮状态劣化或车轮有可能脱落的情况；孟凡西[9]设计了一种烧结机台车车轮脱落预警检测装置，通过将接近开关与烧结机控制电源连锁，实现烧结机车轮状态监测；段峰等[10]设计了一种带式烧结机台车防跑偏结构，减少了由于烧结机台车跑偏造成车轮损坏的维护量和事故停机时间。但是上述方法在检测过程中需要高精度检测装置，同时在检测仪器部署时候结构复杂使得检测成本增加，不利于大范围推广。随着人工智能的快速发展，其应用已经越来越广泛，在车轮踏面检测方面：杨凯等[11]通过深度学习实现了列车车轮踏面表面缺陷的自动化检测；郑茹丹等[12]使用 Faster R-CNN 算法实现了车轮踏面缺陷检测；侯涛等[13]通过对车轮踏面图像处理实现了车轮踏面自动检测。烧结机台车车轮踏面缺陷检测的自动化程度可决定烧结机台车能够正常运行的时间周期，因此设计快速高效的智能化检测系统对于实际生产至关重要。

综上所述，本文采用 YOLOv5 作为烧结机台车车轮踏面缺陷检测算法，使用 PyQt(Python 自带的系统界面设计库) 和 MySql(一种存储数据的数据库) 构建车轮踏面缺陷检测系统，该系统包括车轮踏面检测、报警、微信推送、数据库存储以及数据分析等功能，以期对车轮踏面缺陷进行有效检测，为现场生产提供保障。

1　车轮踏面缺陷检测系统设计方案

烧结机台车车轮踏面缺陷检测系统设计方案如图 1 所示。结合图 1，当烧结机台车车轮运行到摄像头正下方时，摄像头捕捉到车轮踏面画面时检测系统则启动 YOLOv5 算法对车轮踏面状况进行检测，系统检测到车轮踏面存在缺陷时则和系统预先设定的缺陷置信度进行比对：如果检测出的缺陷置信度大于系统设定的缺陷置信度则进行信息提示和报警提示，并对当前车轮踏面状态和车轮编号画面进行截图，同时将截图在检测系统中展示，以便工程师确定车轮踏面缺陷具体部位；如果检测出的缺陷置信度小于系统设定的置信度则只进行信息提示而不报警，并将所有提示信息都保存到数据库中。

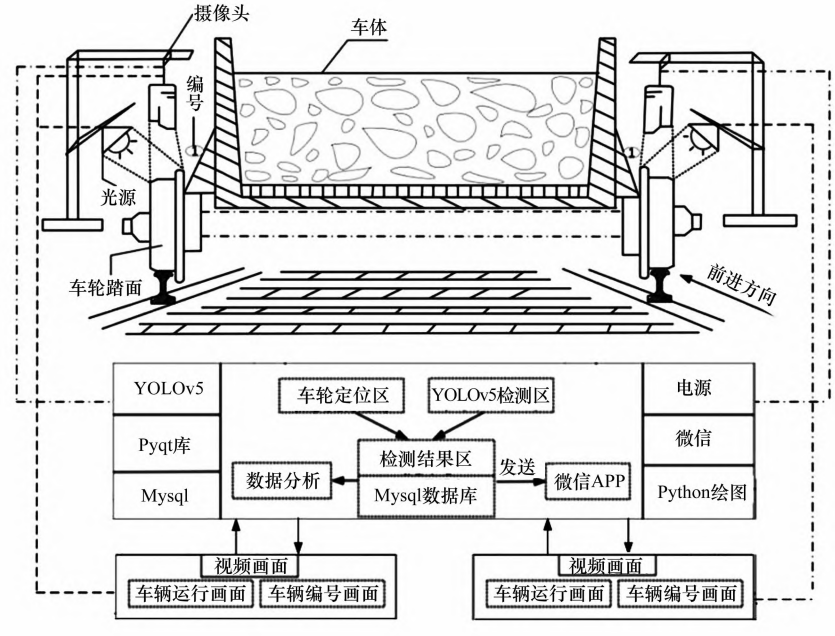


图 1　车轮踏面缺陷检测系统设计方案

Fig. 1　Design scheme of wheel tread defect detection system

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

此次烧结机台车车轮踏面缺陷检测还设计了数据分析系统对数据库进行统计分析，并对分析结果进行可视化，工程师根据图形分析可以对烧结机台车车轮踏面进行提前防护，为使检测系统贴合工程师的使用习惯，系统将与微信 APP 进行通讯，当系统检测到车轮踏面存在缺陷时自动开启微信并将检测信息推送给现场工程师，实现远程监控目的。

2 车轮踏面缺陷检测算法

YOLOv5 是单阶段目标检测算法，其与两阶段检测算法相比更能满足检测过程的实时性，检测过程中主要通过损失函数变化来判断模型训练是否成功，YOLOv5 算法结构及检测过程如图 2 所示。

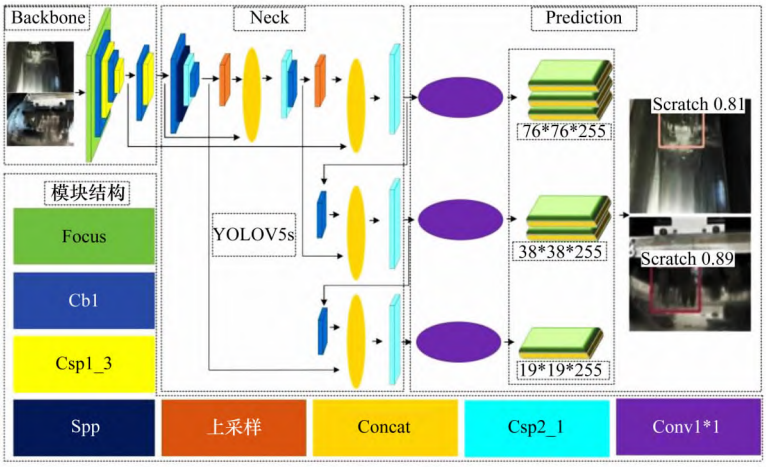


图 2 YOLOv5 结构及检测过程

Fig. 2 The structure and detection process of YOLOv5

检测过程中 YOLOv5 损失函数变化类型有 3 种，分别为：① 分类损失函数；② 定位损失函数；③ 置信度损失函数。总体损失为 3 种损失函数加权和，YOLOv5 检测算法主要任务是目标框预测，要框选出目标，需对边框数据进行预测。预测框使用的损失函数如式(1)所示。

$$Llocal = (X - X^*)^2 + (Y - Y^*)^2 + (W - W^*)^2 + (H - H^*)^2 \quad (1)$$

式中：X、Y、W、H 代表预测框的横、纵坐标、长度、宽度，m。

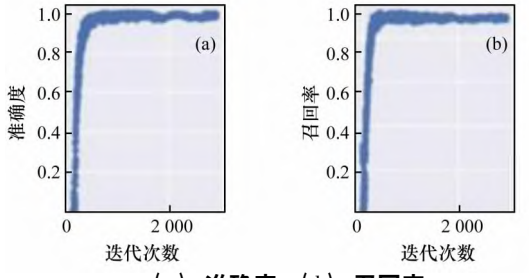
YOLOv5 模型测试结果通常使用精确率(Precision)和召回率(Recall)作为评价标准。精确率即查准率是指准确检出的目标物体与所有检出目标物体的比值，设准确检出目标物体的数量为 TP，检出目标物体但不正确的数量为 FP，则查准率如式(2)所示。

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

召回率即查全率指准确检出的目标物体占所有此类型目标物体的比例，设准确检出的目标物体数量为 TP，同一类型但未检出的目标物体数量为 FN，则查准率如式(3)所示。

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

P 和 R 值越大模型越好，反之越差。本次模型训练在 Linux 操作系统上完成，系统环境：Intel(R) Core(TM) i9 - 9900K CPU，主频 3.60 GHz，运行内存 64 GB，两块英伟达的 2080Ti GPU。模型训练使用包钢烧结机台车车轮踏面缺陷数据集和包神铁路车轮踏面缺陷数据集，此次模型训练共有车轮踏面缺陷数据集 441 张，其中 8% 作为测试集，剩余数据作为训练集。YOLOv5 模型训练结果如图 3 所示。



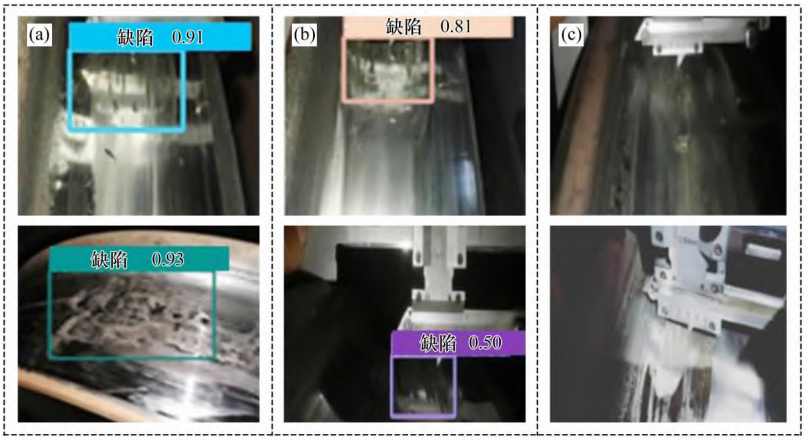
(a) 准确度；(b) 召回率

图 3 YOLOv5 模型训练结果

Fig. 3 YOLOv5 model training results

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由图 3 可以看出，随着迭代次数的增加，YOLOv5 模型检测准确度和召回率都在不断提高，且模型在训练过程中图形曲线变化较为平缓，没有出现明显跳动，检测准确度和召回率上升曲线最终都趋于 0.9 附近，因此训练模型可以用作烧结机台车车轮踏面缺陷检测，通过使用测试集对 YOLOv5 训练模型进行测试，部分测试结果如图 4 所示。其中：图 4(a) 表示 YOLOv5 模型检测到车轮踏面存在缺陷，置信度达到 0.9 以上；图 4(b) 表示 YOLOv5 模型可以检测到车轮踏面缺陷，置信度达到 0.5 以上；图 4(c) 表示 YOLOv5 模型无法识别到车轮踏面缺陷类型。



(a) 车轮踏面存在缺陷；(b) 车轮踏面缺陷；(c) 漏检缺陷

图 4　YOLOv5 模型检测结果

Fig. 4　YOLOv5 model test results

根据图 4，比较图 4(a) 和图 4(b) 可以看出，图 4(a) 中车轮踏面所存在的缺陷更加明显，所以 YOLOv5 模型对图(a) 检测结果置信度更高，符合实际情况。通过分析发现漏检缺陷集中在车轮踏面微小剥离或轻微擦伤这种缺陷类型，由于 YOLOv5 模型训练时这类车轮踏面缺陷数据较少，导致 YOLOv5 模型无法充分学习到该类型缺陷特征，经咨询现场工程师，这类缺陷一般不会对烧结机台车车轮正常运行造成影响，因此不影响 YOLOv5 模型对车轮踏面缺陷检测的实际应用。

3　烧结机台车车轮踏面缺陷检测系统的应用

烧结机台车车轮踏面缺陷检测系统运行流程如图 5 所示。系统运行之前需设定缺陷阈值，利用拍摄的车轮运行视频进行试验，当车轮运行至系统检测区域且车轮踏面存在缺陷时，系统能够自动对缺陷部位进行截图并呈现在对应区域，同时启动微信将检测结果发送给工程师，检测数据也实时保存到数据库。通过试验，数据分析系统可以实现对数据库的统计分析，并按照预想将分析结果显示在对应区域。试验过程中检测系统有效完成了各个模块功能的联动运行，与人工检测相比系统检测不会出现疲劳、主观判断等情况，可有效提高生产效率。

3.1　系统报警及微信推送功能的实现

烧结机台车车轮踏面缺陷检测系统报警功能使用 Winsound 模块(Python 自带的声音调用模块)实现，微信消息推送功能使用 WeChat 模块(Python 自带的微信接口模块)来实现，当检测系统发现车轮踏面存在缺陷且缺陷置信度大于系统设定置信度时则会触发该模块的运行，WeChat 模块运行后系统会实现微信强制启动，达到调用微信的目的，以此实现检测系统远程传送功能。

3.2　烧结机台车车轮踏面缺陷检测系统结果分析

此次烧结机台车车轮踏面缺陷检测系统功能测试以包钢烧结机台车车轮踏面视频和车轮编号视频进行试验，经过人工统计视频中共有缺陷 35 处。为了排除偶然性本次试验分三次进行，通过对视频剪辑得到两段分别包含缺陷数量为 25 处和 15 处的视频，利用检测系统分别对原视频和剪辑的两段视频进行测试。

车轮踏面缺陷检测系统测试结果如表 1 所示。试验中烧结机台车车轮踏面缺陷检测系统置信度设置为0.9和0.5两种，在实际工艺使用中，可

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

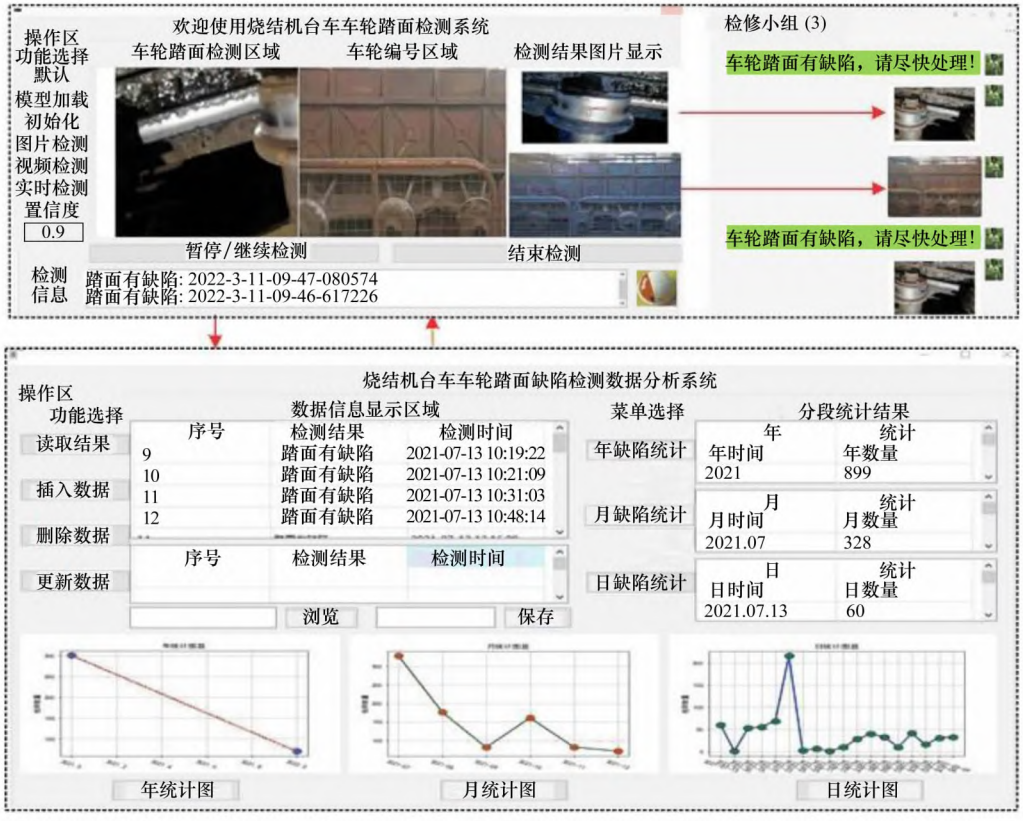


图 5 车轮踏面缺陷检测系统运行效果

Fig. 5 Operation effect of wheel tread defect detection system

根据实际需求设置车轮踏面缺陷置信度。表 1 中 $Q>0.9$，表示系统检测出的车轮踏面缺陷置信度 Q 大于 0.9，$Q>0.5$ 表示系统检测出的车轮踏面缺陷置信度 Q 大于 0.5。试验中可以发现，当检测系统置信度设置为 0.9 时绝大部分车轮踏面缺陷可以被检测出来，如果为了更严格的检测，检测系统置信度可设为 0.5，此时检测系统对车轮踏面检测更加严格。当检测系统置信度设为 0.5 时，试验中还是存在少量的漏检现象，原因之前已阐述，这里不在赘述。当系统检测出车轮踏面存在缺陷时，系统进行消息提示并启动报警和微信推送功能，同时将提示信息保存到数据库。

表 1 车轮踏面缺陷检测系统测试结果

Table 1 Test results of wheel tread defect detection system

视频包含缺陷总数/处	35	25	15
系统检出缺陷数量($Q>0.9$)/处	32	22	14
系统检出缺陷数量($Q>0.5$)/处	33	23	14

当检测系统置信度为 0.5 时根据式(2)、式(3)及表 1 计算出烧结机台车车轮踏面缺陷检测系统对于三次车轮踏面缺陷的查准率、查全率和漏检率，计算结果如表 2 所示。

表 2 三次试验查准率、查全率和漏检率

Table 2 The precision、recall and missed detection rate of three experiments

查准率	查全率	漏检率
$P_{35}=\frac{TP}{TP+FP}=\frac{33}{33+0}\times100\%=100\%$	$R_{35}=\frac{TP}{TP+FN}=\frac{33}{33+2}\times100\%=94.3\%$	$L_{35}=\frac{2}{35}\times100\%=5.7\%$
$P_{25}=\frac{TP}{TP+FP}=\frac{23}{23+0}\times100\%=100\%$	$R_{25}=\frac{TP}{TP+FN}=\frac{23}{23+2}\times100\%=92\%$	$L_{25}=\frac{2}{25}\times100\%=8\%$
$P_{15}=\frac{TP}{TP+FP}=\frac{14}{14+0}\times100\%=100\%$	$R_{15}=\frac{TP}{TP+FN}=\frac{14}{14+1}\times100\%=93.3\%$	$L_{15}=\frac{1}{15}\times100\%=6.67\%$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由表 1 和表 2 可以看出：当检测系统置信度为 0.5 时，系统三次试验分别可以检出 33 处、23 处、14 处车轮踏面缺陷，烧结机车轮踏面缺陷检测系统查全率为 92% 以上，查准率可以达到 100%，系统在检测到车轮踏面存在缺陷时微信推送和报警功能可以实时响应。

4　结　论

(1) 烧结机台车车轮踏面缺陷检测系统使用 YOLOv5 目标检测算法可实现对车轮踏面缺陷的检测，其查全率为 92% 以上，查准率可以达到 100%，其细微缺陷的漏检基本不影响烧结机台车车轮正常运行。

(2) 在检测过程中系统各个功能模块都能正常运行，其中缺陷检测、系统报警、微信推送以及数据存储都能实时响应，能够满足实际生产的需求，可为烧结机车轮踏面状况提供实时的数据支撑。

参考文献:

[1] 霍景荣,李玉红,赵国顺. 台车运行中故障的预防与应急处理[J]. 烧结球团,2007,32(5):55-58.
HUO Jingrong, LI Yuhong, ZHAO Guoshun. Prevention and emergency treatment of faults in trolley operation[J]. Sintering and pelletizing,2007,32(5):55-58.

[2] 邓志宏. 烧结机“顿车”现象的分析及处理[J]. 烧结球团,2016,41(2):17-20.
DENG Zhihong. Analysis and treatment of the “pagging” phenomenon of sintering machine[J]. Sintering and pelletizing,2016,41(2):17-20.

[3] 史鸿祥. 客车车轮踏面擦伤及其危害[J]. 铁道车辆,1994(11):56-57.
SHI Hongxiang. Scratches and hazards of passenger car wheel treads[J]. Railway Cars,1994(11):56-57.

[4] 刘继,冯铭. 车轮踏面擦伤在线自动检测方法的研究和试验[J]. 铁道车辆,1995(2):28-31.
LIU Ji, FENG Ming. Research and test of on-line automatic detection method for wheel tread scratches[J]. Railroad Vehicles,1995(2):28-31.

[5] 彭丽娟. 车轮踏面擦伤及其检测新技术[J]. 铁道知识,1996(1):34.
PENG Lijuan. Wheel tread scratches and its new detection technology[J]. Railway Knowledge,1996(1):34.

[6] 张渝,王黎,高晓蓉,等. 国内外车轮踏面损伤检测技术综述[J]. 机车车辆工艺,2002(1):1-4;8.
ZHANG Yu, WANG Li, GAO Xiaorong, et al. Overview of detection technology for wheel tread damage at home and abroad[J]. Locomotive and Rolling Stock Technology, 2002(1):1-4;8.

[7] 唐凌剑,徐春玲,成昌省,等. 烧结机台车轮自动检测报警装置: CN202066368U[P]. 2011-12-07.
Tang Lingjian, Xu Chunling, Chengchang Province, etc. Automatic detection and alarm device for wheels of sintering machine: CN202066368U[P]. 2011-12-07.

[8] 韩明明,孙文杰,刘安林,等. 烧结机台车车轮状态检测装置: CN202433209U[P]. 2012-09-12.
HAN Mingming, SUN Wenjie, LIU Anlin, et al. Wheel condition detection device for sintering machine trolley: CN202433209U[P]. 2012-09-12.

[9] 孟凡西. 烧结机台车轮脱落预警检测装置: CN207407690U[P]. 2018-05-25.
MENG Fanxi. Early warning detection device for wheel fall off of sintering machine trolley: CN207407690U[P]. 2018-05-25.

[10] 段峰,冶飞,石红兵. 一种带式烧结机台车防跑偏结构: CN212902644U[P]. 2021-04-06.
DUAN Feng, YE Fei, SHI Hongbing. An anti-deviation structure of belt sintering machine trolley: CN212902644U[P]. 2021-04-06.

[11] 杨凯,李锐,罗林,等. 基于深度学习的车轮踏面表面缺陷检测研究[J]. 信息技术,2021(7):93-97.
YANG Kai, LI Rui, LUO Lin, et al. Research on surface defect detection of wheel tread based on deep learning[J]. Information Technology,2021(7):93-97.

[12] 郑茹丹,李金龙,张渝,等. 基于改进 Faster R-CNN 的车轮踏面缺陷检测[J]. 中国铁路,2021(3):131-135.
ZHENG Rudan, LI Jinlong, ZHANG Yu, et al. Wheel tread defect detection based on improved Faster R-CNN[J]. China Railway,2021(3):131-135.

[13] 侯涛,张志腾. 改进 Canny 算子在列车车轮踏面损伤检测中的应用[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(8):2107-2112.
HOU Tao, ZHANG Zhiteng. Application of improved canny operator in damage detection of train wheel tread[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018,15(8):2107-2112.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net