

基于机器视觉的公铁联运车导引落轨检测系统

庞松, 马锦锐, 王雪梅, 倪文波

(西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031)

摘要: 为了解决目前公铁联运车落轨时需要人工辅助, 效率较低的问题, 基于机器视觉技术, 设计并实现了公铁联运车导引落轨检测系统; 系统利用安装在转向架附近车架下的摄像头获取车辆与钢轨的图像信息, 采用边缘检测和 Hough 变换结合的算法来检测地面标志线与车辆钢轮的相对位置, 计算出车辆钢轮与钢轨之间的偏移距离和角度; 测量结果通过工业无线网络传送到驾驶室里的平板显示器上, 辅助司机调整车辆位置完成精准落轨; 现场试验表明: 导引落轨检测系统能够实时有效测量钢轨与钢轮的距离, 检测误差不超过 ± 3 mm, 且结果更新时间低于 200 ms, 满足转向架落轨精度和实时性要求。

关键词: 公铁联运车; 测距; 边缘检测; 概率 Hough 变换

Guiding Wheel Dropped Detection System for Rail-road Vehicle Based on Machine Vision

Pang Song, Ma Jinrui, Wang Xuemei, Ni Wenbo

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to solve the problem that current dropping the steel wheel of rail-road vehicle needs manual assistance and the efficiency is low, a guiding wheel dropped detection system for rail-road vehicle was designed and implemented based on machine vision. The system made use of the camera mounted near the bogie to obtain the image information of the vehicle and the rail, and combined the algorithms of the Edge detection and Hough transform to detect the relative position of the ground marking line and the steel wheel of the vehicle, accordingly to calculate the distance and angle between the rail and the steel wheel of the vehicle finally. The measurement results were transmitted to the flat-panel monitor, in the cab through the industrial wireless network to assist the driver adjusting the position of the vehicle to complete the accurate landing. Experiments show that the system can effectively measure the distance between the rail and the steel wheel in real time. The measurement error is less than ± 3 mm, and the update time of the result is less than 200 ms, which meets the requirements of the accuracy and real-time of the bogie dropping.

Keywords: rail-road vehicle; measuring distance; edge detection; probabilistic Hough transform

0 引言

公铁联运车是一种既可在公路上运行也可在铁路上运行的新型运输车辆。这种车在公路上由集卡车车头进行牵引行驶, 由公路转铁路时, 汽车车胎上升到一定高度后, 钢轮被放下, 落在钢轨上, 即转成铁路运行。它能够在所有铁路和公路覆盖的区域进行运输或作业, 集铁路长距离、低成本和公路灵活机动、“门到门”的运输的双重优势于一身, 是一种非常符合我国经济与运输业发展需要, 成本低、周转快、效率高的多式联运方式^[1]。

目前世界上的公铁联运车基本都是采用人工辅助方式进行落轨对准, 即一人在车旁利用人眼目测估计出钢轮与钢轨的距离, 指挥集卡车司机调整钢轮与铁轨的相对位置, 从而实现对准落轨。这种方法耗费人力且落轨效率不高。

随着计算机技术和数字图像处理技术的快速发展, 基于机器视觉的测量技术因其具有测量速度快、系统结构简单、安装方便等优点, 在工业几何量测试中得到广泛的应用^[2]。采用机器视觉测量技术取代人工指挥落轨操作方式, 可解放人力, 极大地提高生产效率, 促进公铁联运车更好的推广应用。

1 系统总体检测方案

公铁联运车导引落轨检测系统检测方案如图 1 所示, 在铁轨旁画上白线和黄线, 集卡车司机通过后视镜观察黄线与车胎的相对位置, 进行联运车的粗定位。落轨检测系统的摄像头固定安装在车架下方, 其光轴与地面垂直, 车架与摄像头可视为一个整体, 摄像头安装位置与联运车钢轮的相对位置一定。因此, 通过检测摄像头中心在地平面

收稿日期: 2020-10-19; 修回日期: 2020-11-12。

作者简介: 庞松(1997-), 男, 四川达州人, 硕士研究生, 主要从事机器视觉方向的研究。

通讯作者: 王雪梅(1968-), 女, 四川绵阳人, 副教授, 博士, 主要从事测控技术及其在轨道交通中的应用方向的研究。

引用格式: 庞松, 马锦锐, 王雪梅, 等. 基于机器视觉的公铁联运车导引落轨检测系统[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 54-58.

的投影点与白色标志线的偏移距离和偏移角度, 可以换算得到联运车钢轮与白色标志线的偏移距离和偏移角度。白色标志线与钢轨的位置关系同样固定不变, 进而可以计算出钢轮与钢轨的偏移距离和偏移角度。集卡车司机根据此信息控制联运车钢轮与钢轨的相对位置, 使其对准, 进行落轨精定位。

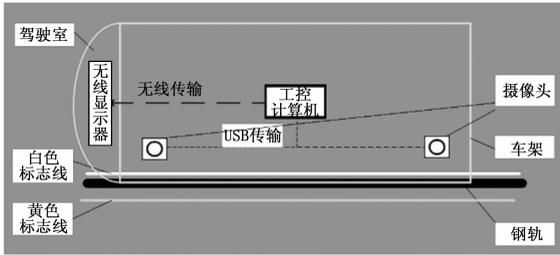


图 1 落轨检测方案图

系统整体结构分为 3 个部分, 图像采集部分、工控机核心处理部分和平板显示部分, 如图 2 所示。首先利用安装在转向架附近车架下方的摄像头, 采集车架下方区域的图像信息, 并传输至位于联运车电气箱内的工控机。工控机对采集的数字图像进行矫正、处理和计算, 得到联运车钢轮与地面钢轨之间的相对位置关系, 并通过无线方式将结果传输至上位机。上位机是位于驾驶室的平板显示器, 用以指导司机操作联运车完成落轨动作。

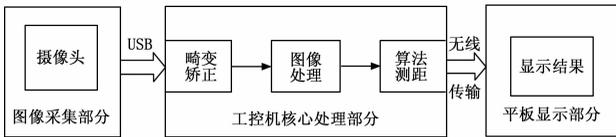


图 2 系统整体结构

根据公铁联运车落轨要求, 检测系统需具有较高精度, 最大落轨误差不应超过 $\pm 3 \text{ mm}$, 同时需具有一定实时性, 单相机系统平均响应时间不应超过 200 ms , 双相机系统平均响应时间不应超过 500 ms , 根据粗定位的范围大小, 确定检测范围应大于 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。

2 硬件设计

公铁联运车导引落轨检测系统硬件部分主要由摄像头、工控机、工业无线路由器、电源和平板显示器等组成。

2.1 摄像头的选型

摄像头的选型既要考虑安装位置和图像采集范围等因素, 又需要满足系统对检测精度和响应时间的要求。因此, 系统选择了带 USB3.0 接口的高速工业数字单目相机。它采用一种逐行 CMOS 型传感器, 帧率为 20 fps , 每次采集图像时间间隔为 50 ms , 能够满足系统响应时间的要求。摄像头可视角度为 120° , 安装高度约 1 m , 图像采集范围可达 $1.8 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$, 满足检测范围要求。其最高分辨率可达 2592×1944 像素, 像素间距为 0.7 mm/pixel , 能够满足落轨检测系统的精度要求 $\pm 3 \text{ mm}$ 。

2.2 工控机和工业无线路由器选型

工业控制计算机是整个检测系统的主控制器, 主要负责接收图像数据、分析处理图像和网络传输等功能, 所选工控机的处理器为 Windows10 操作系统, Intel Core i5 处理器能够较为快速地处理图形运算工作, 保证系统检测的实时性。

工控器把检测结果通过无线网络传输至位于驾驶室的平板显示器, 传输内容包括检测结果和感兴趣区域 (ROI) 的图像。图像大小约为 0.31 MB , 传输速度至少为 50 Mb/s 才能达到 20 fps 的显示帧率, 因此无线路由器选择了百兆级工业路由器。

3 软件设计

本系统下位机和上位机程序均是基于 Windows 系统下的 LabVIEW 平台实现。系统的下位机程序流程图如图 3 所示, 程序开始后, 利用 LabVIEW 视觉模块中的 Configure Grab.vi 进行摄像头的初始化配置并利用 Grab.vi 获取一帧图像。使用 C 语言基于 OpenCV 编写了图像处理程序并生成动态链接库 (Dynamic-link Library, DLL), 在 LabVIEW 中调用 DLL, 从而实现对获取的图像帧进行畸变矫正、图像处理和距离计算等功能, 最后将检测结果和所采集的轨面图像通过 TCP/IP 协议传输至上位机。上位机程序界面如图 4 所示, 实现检测结果和轨面图像的实时显示功能。

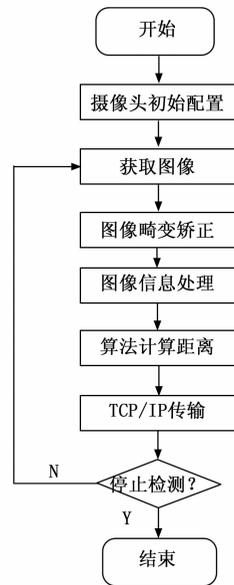


图 3 下位机程序流程图

3.1 摄像机的标定

单目视觉系统存在无法获取立体信息的缺点, 导致无法计算出被测物在空间中的几何信息, 而且摄像机所采集的图像一般存在畸变误差和透视误差, 因此必须对摄像机进行标定^[3]。本系统的摄像头一经安装后其焦距、位置和方向不会再发生改变, 其焦距也固定不变, 根据这一特点,



图 4 上位机界面图

本系统选择了改进的张正友标定法^[4]对摄像机进行标定, 求得摄像头内外参数和畸变参数, 并对单张图像进行畸变矫正^[5]。

3.2 图像的处理

在实际应用中, 不同的拍摄条件(如天气原因造成的环境光照不足)下采集的图像存在各种各样的问题, 导致获取的图像质量不高。并且图像在经过采集、存储、转换、传输等一系列操作之后, 图像的质量会再次下降。因此在提取图像的特征信息之前, 需要对采集的图像进行增强等处理。

3.2.1 图像的增强

数字图像处理技术中图像增强方法分为空域法和频域法两大类。空域方法的原理是将图像转换为数字二维或三维矩阵, 对矩阵值进行数学处理, 从而实现图像的增强效果。而频域方法是对数字图像进行傅里叶变换, 在频域中使用增强算子以调整图像亮度、对比度或者灰度级别, 从而实现图像的增强^[6]。但是频域方法不能满足对图像的所有部分都能较好增强, 且算法缺少自适应能力。

本系统选择了空域方法中的直方图均衡法。该算法的传统做法是将图像灰度信息通过非线性函数映射为在每个灰度级上的均匀分布信息, 这种方法具有较好的对比度增强能力和动态能力, 但由于其在均衡过程中没有对图像灰度数据加以选择, 因此对背景噪声的对比度也有一定的增强, 并且使图像的细节消失。针对传统方法的不足, Kim 提出了一种基于灰度图像均值分割的亮度均值稳定的直方图均衡化算法(BBHE)^[7], 这种算法既能够一直保持灰度图像的亮度均值不变, 又能增强图像对比度。Wan 等人还提出了等面积的双子图像直方图均衡化算法(DSIHE)^[8], 这种算法将图像分割为两个像素点数相等的图像分别进行均衡化。此外, 最大亮度双直方图均衡化算法(MMBEBHE)^[9]通过计算图像的绝对平均亮度差, 确保了增强后的图像与原图的亮度均值的误差值最小。本文对采集图像分别进行以上方法增强, 增强效果分别如图 5 和图 6 所示。

从均衡化效果图和直方图可以看出, BBHE 算法增强的图像出现了一定程度的退化效应, 图像低亮度区域的信息有部分丢失, 并且在增大了灰度图像的对比度的同时, 引入了噪声。DSIHE 算法和 MMBEBHE 算法处理后的图

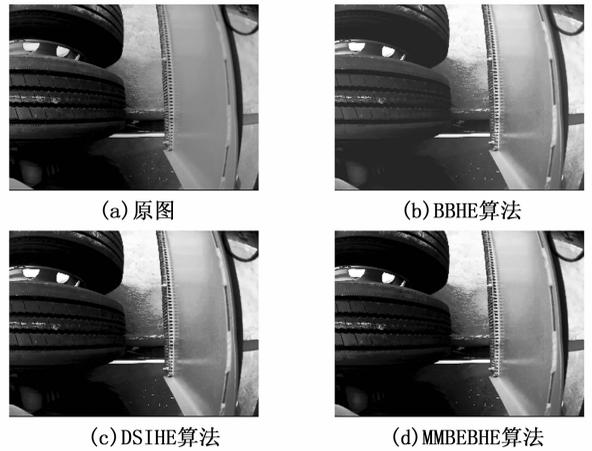


图 5 不同方法均衡化效果图对比

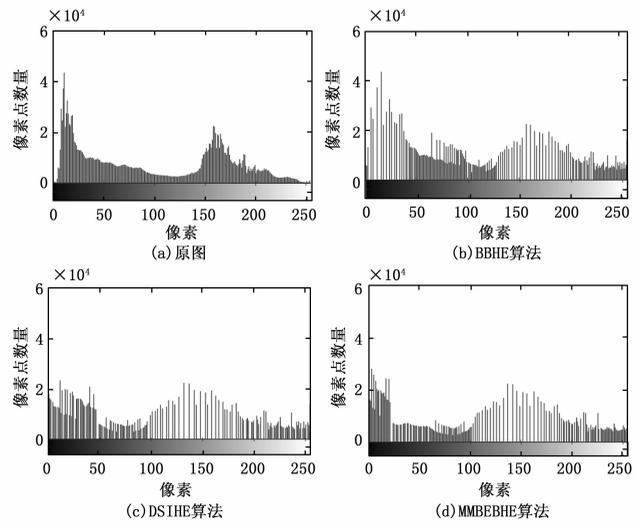


图 6 不同方法均衡化直方图比较

像出现的退化效应较小, 但也产生了噪声。MMBEBHE 算法计算过于复杂, 十分耗时, 处理一幅 $1\ 600 \times 1\ 200$ 像素规格的灰度图像需耗费 3.8 秒, 远远达不到检测系统实时性的要求。综上分析比较, 本系统选择了 DSIHE 算法作为图像增强算法。

3.2.2 提取边缘信息

针对本系统所测对象模型, 考虑摄像机安装位置固定, 检测系统确定了一块包含白色标志线和钢轨图像的矩形 ROI 区域, 以此作后续处理计算。这块区域大小为 130×600 像素, 如图 7 (a) 所示。

系统需从图像 ROI 中提取出白色标志线的边缘特征, 因此需对图像进行边缘检测。本系统选择的边缘检测算子是 Canny 算子^[10], 这种边缘检测算子不容易受噪声干扰, 对边缘定位非常准确, 图像边缘精确到一个像素点, 检测精度非常高。其原理是先利用高斯滤波器对图像进行平滑, 再根据数字图像矩阵的一阶有限差分近似代替导数, 计算图像梯度矢量的模和方向, 从而确定边缘点。图像的边缘

点即为在方向上使取得局部极大值的点。

$$M_a = \| f(x, y) * \nabla G_a(x, y) \| \quad (1)$$

$$A_a = \frac{f(x, y) * \nabla G_a(x, y)}{\| f(x, y) * \nabla G_a(x, y) \|} \quad (2)$$

式中, $f(x, y)$ 为图像函数; $G_a(x, y)$ 为高斯滤波函数; M_a 和 A_a 分别为梯度矢量的模和方向。

从图 7 (b) 可以看出, Canny 边缘检测的效果整体上较好, 准确检测出了预设白色标志线的边缘直线。但是, 白色标志线左侧边缘信息被过度平滑, 产生了局部图像的失真。同时, 边缘检测图像中除了白色标志线的边缘信息, 还可能存在其他干扰信息, 例如, 图 7 (b) 中标志线边缘上方存在一段近似和标志线平行的干扰信息。这可能会导致测量结果发生严重的偏差, 所以, 还需对标志线进行进一步特征提取。因为标志线始终是两条平行直线, 根据这一特征, 选择了利用概率 Hough 变换^[11]对图像中的直线进行自动识别定位。

如图 7 (c) 所示, 通过概率 Hough 变换, 标志线的特征非常好地被提取了出来, 可直接得到标志线上下边缘直线的 4 个端点的坐标值, 这为后续算法计算距离提供了依据。值得注意的是, Canny 算法造成的左侧边缘失真对 Hough 变换的效果没有影响。

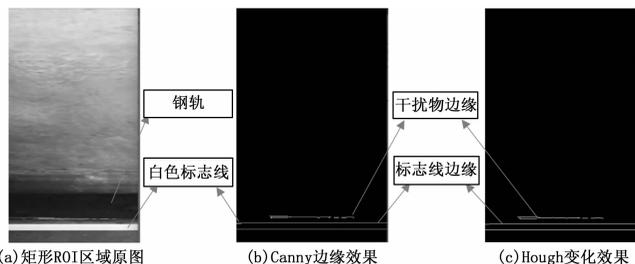


图 7 边缘信息提取效果图

3.3 检测算法

3.3.1 偏移角度

偏移角度是指联运车钢轮与地面钢轨之间形成的夹角, 也即白色标志直线在图像坐标系中的斜率角度。利用 Hough 变换得到了标志线两条边缘直线的 4 个端点坐标值, 根据直线的两点式方程:

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \quad (3)$$

式中, x_1 、 x_2 、 y_1 、 y_2 分别为同一直线两个端点的横纵坐标值。

可以得到两条直线方程为:

$$y_u = k_u x_u + b_u \quad (4)$$

$$y_d = k_d x_d + b_d \quad (5)$$

其中: k_u 和 k_d 分别为上下两条直线的斜率, 且数值相等, 由式 (6) 可计算得到。

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (6)$$

根据斜率就能求得偏移角度 θ 为:

$$\theta = \tan^{-1} k_u \quad (7)$$

3.3.2 偏移距离

如图 8 所示, 取摄像头光轴在地平面的投影点为 $O(x_o, y_o)$, 即采集图像的中心点, 坐标值为 (75, 300)。作 OP 垂直于标志线, 与标志线上边缘相交于点 P , 可计算得到点 P 的坐标值 (x_p, y_p) 。

摄像机的内参数矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, f_x 、 f_y 分别为摄像机在 x 轴和 y 轴上的尺度因子, c_x 、 c_y 为摄像机中心点坐标。

$$d_x = \frac{f}{f_x} \quad (9)$$

$$d_y = \frac{f}{f_y} \quad (10)$$

其中: f 为焦距, d_x 、 d_y 分别为图像坐标轴中 x 、 y 轴上单位像素的尺寸大小。

$$\Delta x_T = \Delta x * d_x \quad (11)$$

$$\Delta y_T = \Delta y * d_y \quad (12)$$

式中, Δx 、 Δy 为 OP 两点在 x 、 y 轴方向上的像素点之差; Δx_T 、 Δy_T 为像素点差值所对应的实际差值。

因此, O 点实际位置与地面钢轨的实际距离 D 为:

$$D = \sqrt{(\Delta x_T)^2 + (\Delta y_T)^2} \quad (13)$$

根据 O 点实际位置与联运车钢轮的位置关系, 进而算出联运车钢轮与地面钢轨之间的偏移距离。

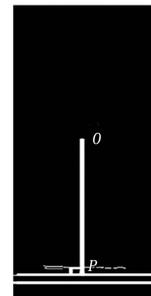


图 8 距离计算示意图

4 现场试验结果与分析

4.1 距离测量精度分析

为验证本系统的精度和稳定性, 分别在不同环境 (雨天、晴天)、不同工况 (车体静止、运动) 下进行现场试验。图 9 为在晴天、雨天, 车体运动、车体静止时的实测数据误差图。从试验数据来看误差值都在允许范围内, 雨天时误差会比晴天时大一些, 车体运动时比静止时误差大一些, 但是仍都在 ± 3 mm 之内, 故系统的测距精度能满足应用要求。

4.2 系统响应时间分析

下位机系统测量得到检测结果后, 需要无线传输到驾

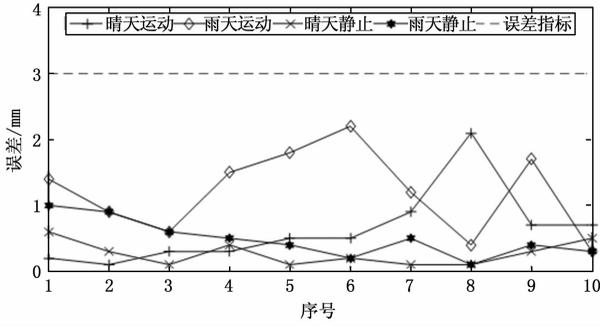


图 9 车体运动实测误差图

驶室的无线显示器上进行显示，为检验系统响应时间，对每一次循环中单相机和双相机拍摄、测距并传输所用的时间进行了测试，测试结果如图 10 所示。可以看出单相机传输效率明显更高，系统响应时间最高不超过 200 ms。双相机系统（车体前后各布置一个摄像机）虽然相比单相机系统的响应时间更长一些，但两种方案的系统响应时间均满足系统设计指标，即不高于 500 ms，故都能满足实际应用对实时性的要求。

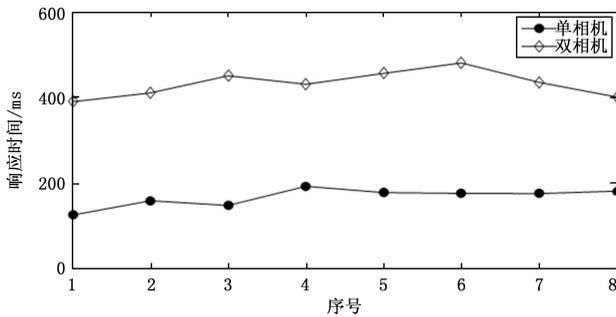


图 10 响应时间测试结果

5 结束语

针对目前公铁联运车落轨时需要人工辅助，效率较低的问题，基于机器视觉研制了公铁联运车导引落轨检测系统。从试验的结果可以看到，系统能够精确检测出联运车钢

轮与钢轨的偏移距离，最大测距误差不超过 ±3 mm；单相机图像检测、处理和传输更新时间不超过 200 ms。检测精度及实时性都能满足应用需要。本系统取代人工指挥落轨的操作方式，可极大地提高生产效率，促进公铁联运车更好的推广应用。

参考文献:

[1] 宋国文, 邢鸿麟. 公铁两用车在我国铁路上应用的可行性研究 [J]. 铁道车辆, 2000 (10): 6-11.

[2] 赖志刚. 基于计算机视觉算法的图像处理技术 [J]. 信息系统工程, 2019 (9): 145.

[3] Salvatore C, Alessandro D G, Giuseppina P. In-vehicle stereo vision system for identification of traffic conflicts between bus and pedestrian [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2017, 4 (1): 3-13.

[4] 刘艳, 李腾飞. 对张正友相机标定法的改进研究 [J]. 光学技术, 2014, 40 (6): 565-570.

[5] 汪永超, 耿丽清. 摄像机标定系统方法研究 [J]. 天津职业技术师范大学学报, 2019, 29 (2): 59-62.

[6] 李艳梅. 图像增强的相关技术及应用研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.

[7] Kim Y T. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1997, 43 (1): 1-8.

[8] Wang Y, Chen Q, Zhang B. Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equalization method [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1999, 45 (1): 70-75.

[9] Chen S D, Ramli A R. Minimum mean brightness error Bi-histogram equalization in contrast enhancement [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 49 (4): 1310-1319.

[10] 王保军, 赵海清, 刘超. 基于 Canny 算子改进的边缘检测算法 [J]. 科学技术创新, 2018 (27): 13-14.

[11] 王琦, 宋伟东, 王竞雪. 基于 Hough 变换的直线提取方法及改进 [J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42 (6): 214-217.

(上接第 53 页)

[2] 朱镇, 高翔, 朱彧, 等. 拖拉机滑转率试验分析 [J]. 机械设计, 2016, 337 (8): 62-66.

[3] 白学峰, 鲁植雄, 常江雪, 等. 基于滑转率的拖拉机自动耕深模糊控制仿真 [J]. 农业机械学报, 2012, 43 (Z1): 6-10.

[4] 张宾, 余群. 轮式拖拉机瞬态滑转率的测量装置 [J]. 中国农业大学学报, 1997 (4): 48-52.

[5] 印祥, 卢博友, 钟以崇, 等. 拖拉机滑转率实时测量中的车速测量方法 [J]. 农机化研究, 2009 (4): 237-240.

[6] 周慧, 鲁植雄, 白学峰, 等. 四轮驱动拖拉机滑转率的测量与特性分析 [J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2013, 44 (3): 423-427.

[7] 钟文军, 高强, 鲁植雄, 等. 路面行驶工况下拖拉机驱动轮

滑转率的测试与分析 [J]. 华中农业大学学报, 2015, 34 (4): 130-136.

[8] 李导, 张志刚, 王在满, 等. 拖拉机滑转率无线测试系统的研制 [J]. 农机化研究, 2018 (8): 241-244.

[9] Chris C. Ward, Karl Iagnemma. A Dynamic-Model-Based Wheel Slip Detector for Mobile Robots on Outdoor Terrain [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24 (4): 821-831.

[10] 曹青梅, 周志立, 张明柱, 等. 拖拉机驱动轮滑转率估算方法与验证 [J]. 农业工程学报, 2015, 31 (23): 35-41.

[11] 杨财, 宋健, 周艳霞. 车辆转向时牵引力控制系统前轮滑转率算法 [J]. 农业机械学报, 2008, 39 (8): 38-40.

[12] 孙晖云, 陈广彦. 基于不平衡转向特性的车轮滑移率估算方法 [J]. 机械工程师, 2015 (8): 159-161.