DOI: 10.13382/j.jemi.B2003771

摩擦系数车测量系统设计与实验分析

周 围 田广军 牛亚东 刘志博 孟凡钦 刘伟玲
(河北工业大学 机械工程学院 天津 300131)

摘 要:针对目前机场跑道摩擦系数车测量控制系统落后、上位机操作繁琐和数据传输不稳定的问题,采用西门子 1200PLC 作为下位机控制系统和基于 C#开发的 Winform 上位机可视化界面,通过 TCP/IP 协议作为二者数据传输的桥梁。采用多线程设计提高数据传输的效率和稳定性,采用巴特沃斯低通滤波器滤除原始数据中的干扰信号。该测量系统使用方便,设置完成后对同一路面进行多次摩擦系数测量实验,测量结果重复性好,平均摩擦系数值标准差在±0.02 范围内,满足民航特种设备相关要求。

关键词: 摩擦系数车;测量控制系统;下位机与上位机;数据传输;多线程;滤波
中图分类号: TH82; TN206 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.4030

Design of surface friction tester measuring system and experiment analysis

Zhou Wei Tian Guangjun Niu Yadong Liu Zhibo Meng Fanqin Liu Weiling
(College of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China)

Abstract: Aiming at the problems that the backwardness of the airport surface friction tester's measurement and control system, the cumbersome operation of the upper computer, and the unstable data transmission, Siemens 1200 PLC is used as the lower computer control system and the Winform upper computer visual interface developed based on C#. Through TCP/IP protocol as a bridge between the two data transmission. Multi-threaded design is used to improve the efficiency and stability of data transmission, and Butterworth low-pass filter is used to filter out interference signals in the original data. The measurement system is easy to use. After the setting is completed, multiple friction coefficient measurement experiments are performed on the same road surface. The measurement results have good repeatability and the standard deviation of the average friction coefficient value is within ±0.02, which meets the relevant requirements of civil aviation special equipment.

Keywords: airport surface friction tester; measurement and control system; lower and upper computer; data transmission; multi-threaded; filter

0 引 言

摩擦系数车是一种专用设备,对汽车后桥增加测量轮并安装多种传感器进行跑道摩擦信息采集[1],既可用于机场跑道摩擦系数的测量,也可用于高速公路摩擦系数测量。

针对不同类型的摩擦测量设备,美国材料实验协会对路面摩擦系数测量方法和实验条件制定了测量标准[2-4]。在研究路面宏观微观纹理的基础上,建立基于路面纹理估算摩擦力和摩擦系数的摩擦模型[5-9]。摩擦系数的测量方法分为基于效果法与基于原因法[10],而这些方法不能准确测量特殊环境下的摩擦性能,需通过大量的实验研究对测量结果的影响[11]。

文献[12-16]对测量系统标定装置和外部振动对测量结果的影响进行了分析研究,弹簧秤读数误差大且测量系统的下位机控制系统落后,兼容性差,测量结果中存在高频干扰信号,文献[17-18]考虑基于横纵向力系数权重的路面综合摩擦系数评价方法。文献[19]基于 LabVIEW 开发的测量系统在数据传输时偶尔会丢失数

收稿日期: 2020-12-13 Received Date: 2020-12-13

据,需要改善数据传输的稳定性。文献[20]提出了多传感器信息融合方案来估计轮胎与跑道之间的摩擦系数,是一种可行的方法,测量系统需要采集跑道多个信息,对已有数据和经验有较高的要求,可作为下一步改进研究的方向。

在实际测量过程中,下位机和上位机需要实时采集传感器数据和监视传感器或执行机构的状态,需要上位机与下位机之间保持紧密通信,传输的数据量比较大,实时性要求较高。针对现有摩擦系数车控制系统落后和数据传输不稳定的问题,本文主要设计了以1200PLC为控制核心的多传感器下位机控制系统和全新的上位机可视化界面,采用比传统RS232更加可靠的以太网通信作为上位机与下位机数据更加可靠的通信连接桥梁。为了减小车辆和机械控制结构自身存在的振动或者外部带来的干扰,提高摩擦系数测量精度,设计滤波器对水平摩擦力传感器输出信号进行滤波,重新设计了电子式标定装置,减小人为读数误差。

1　测量系统组成及检测原理

1.1　系统组成

为保证飞行安全,需要对机场的跑道摩擦性能进行测量,目前使用最广泛的是摩擦系数车。其后桥系统示意图如图1所示,其中,图右上角为蓄能器,其作用是保证在测量的过程中测量轮的正压力波动的幅度在±5 kg范围内。在摩擦系数车的后桥系统中,安装了许多传感器,如水平力传感器、霍尔脉冲传感器、垂直力传感器等、温度传感器、液位传感器等。

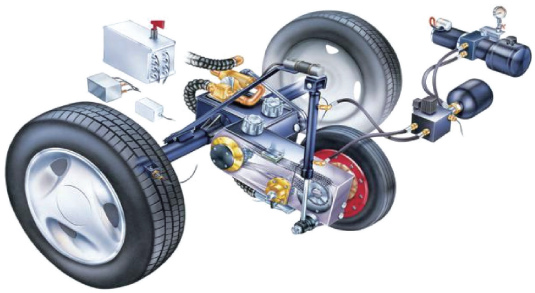


图1　摩擦系数车后桥系统示意图

Fig. 1　Schematic diagram of rear axle system of friction coefficient tester

摩擦系数车测量系统组成如图2所示,系统包括下位机PLC中央处理器、上位机、打印机、传感器等。

1.2　检测原理

摩擦系数车的测量原理为:测量轮落下后,车后轮转动带动单向差速离合器转动,前传动链带动链轮转动,后传动链带动测量轮转动,从而使测量系统进行工作。测量轮受到地面摩擦力 F_f,的作用会拉紧后传动链,链条上形成两个大小相等,方向相反的力,这两个力在张紧轮上产生夹角 α,其向下的合力 F 可由安装在张紧轮上的水平力传感器测出,原理如图3所示。

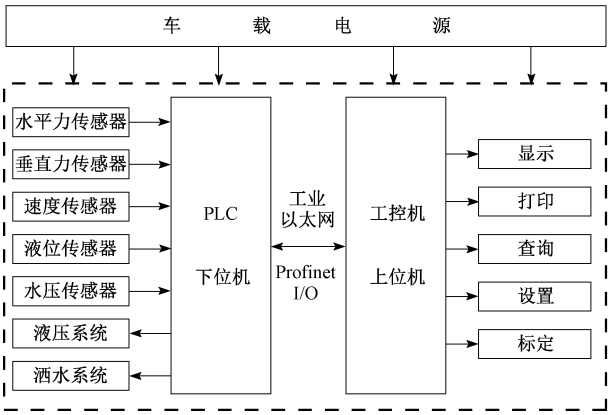


图2　测量系统组成

Fig. 2　Measurement system composition diagram

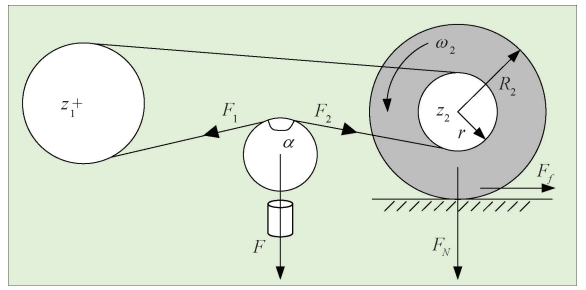


图3　摩擦系数计算原理

Fig. 3　Calculation schematic diagram of friction coefficient

水平传感器力的大小为 F,F_1 与 F_2 的夹角为 α,由力矩平衡原理可知:

$$F_1 = F_2 = \frac{F_f R_2}{r} \tag{1}$$

水平传感器 F 为:

$$F = \sqrt{2 \times F_1^2 - 2 \times F_1^2 \cos(\pi - \alpha)} = \sqrt{2} \times \sqrt{1 + \cos\alpha} \times F_1 = \sqrt{2} \times \sqrt{1 + \cos\alpha} \times \frac{F_f R_2}{r} \tag{2}$$

摩擦系数计算公式为:

$$\mu = \frac{F_f}{F_N} \tag{3}$$

式中:F_N 由垂直传感器测得。式(2)与(3)相结合,可得:

$$\mu = \frac{F \times r}{\sqrt{2} \times \sqrt{1 + \cos\alpha} \times R_2 \times F_N} \tag{4}$$

2　测量控制系统设计

2.1　下位机控制系统与上位机软件设计

根据 ICAO 测量规定和民航有关要求,摩擦系数车在测量摩擦系数时的条件是:作用于测试轮上的正压力为 1 372 N 左右、测试轮滑溜比 11%～13%、整车行驶车速为 96 km/h。考虑到测量系统控制的稳定性、可靠性和 IO 控制点数,选择中小型的 1200PLC 作为下位机信号处理单元。设计控制程序把多个功能块分开,各自封装成子程序,完成各自的功能,互不干扰,包括上电自检、标定落轮、测量落轮、抬轮、参数设置和清标志位多个子程序。

根据摩擦系数车测量系统开发任务和需求,测量系统需要完成多个功能,功能包括上电自检功能、测量轮起落控制、传感器标定、测量参数设定、测量任务、数据显示、存储、查询及打印,具体功能说明或实现方式如表 1 所示。

表 1　上位机软件功能表

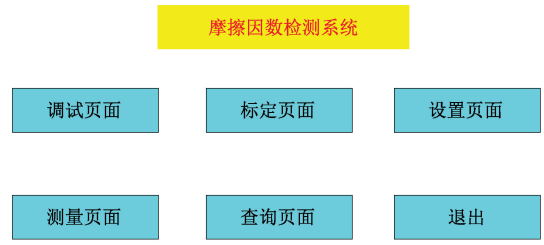
Table 1　Upper computer software function sheet

功能	说明
上电自检	系统自检上位机与下位通信是否正常,测试轮所在位置,水箱液位,系统供电电源
测量轮控制	通过上位机控制电磁阀和电机可以完成抬轮与落轮的操作
传感器标定	分为垂直标定和水平标定,标定过程是采集两个具有代表性的测量点,拟合出一条线性直线
测量参数设定	设置跑道测量参数,包括机场名称、跑道号、测量单返程、跑道状态、水膜厚度、测量距离、起始距离和测量速度等
测量任务	完成测量参数的设定后,进入测量页面,启动车辆加速至设定的测量速度,程序会根据控制逻辑自动落轮,落轮后保持高于测量速度行驶到达起始距离时,读取测量的摩擦系数值并实时显示和写入文件,直至测量结束完成数据存储。否则弹出测量加速失败;若正式测量途中急刹车,测量轮会自动抬起,弹出急刹车测量失败
查询及打印	在查询页面根据测量日期选取要查询的数据,可以查询某日的测量数据和曲线,点击打印即可实现曲线打印

上位机的开发基于 Windows Visual Studio 平台,选择 C#作为开发语言,全新的上位机可视化界面如图 4 所示。

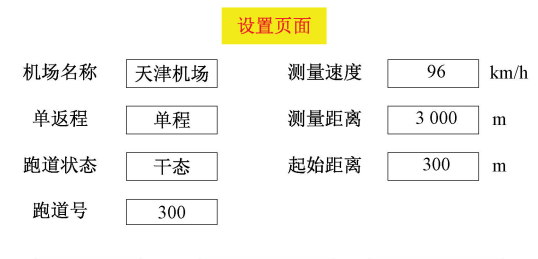
2.2　力传感器标定

摩擦系数车超过两周没有对传感器标定校准时,由于上一次的液压系统与测量轮自身重力与本次所处的状态不一致,导致上次标定数值不适用于此时的传感器,因此需要对力传感器重新进行标定。国内开发了对力传感器的标定装置,相比于国外的摩擦系数车在重新标定时需送往计量机构方便许多。力传感器标定步骤的操作流程如图 5 所示。



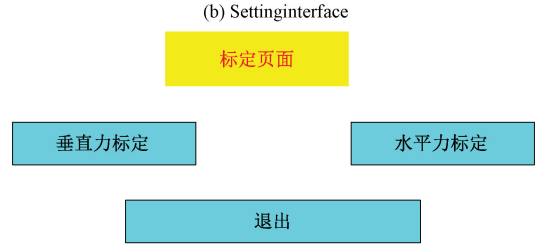
(a) 检测系统主界面

(a) Main interface of the detection system



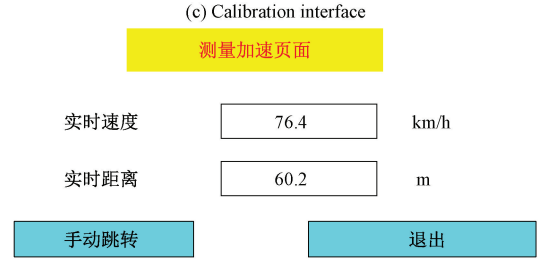
(b) 设置界面

(b) Settinginterface



(c) 标定界面

(c) Calibration interface

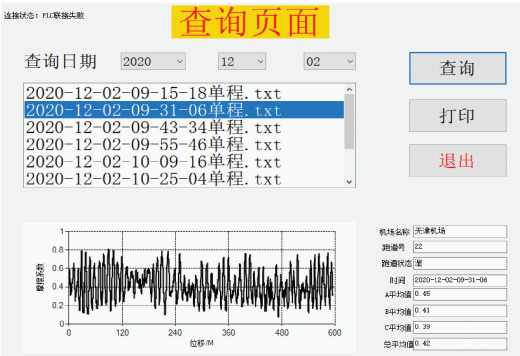


(d) 测量加速界面

(d) Measurement accelerating interface

(e) 测量界面

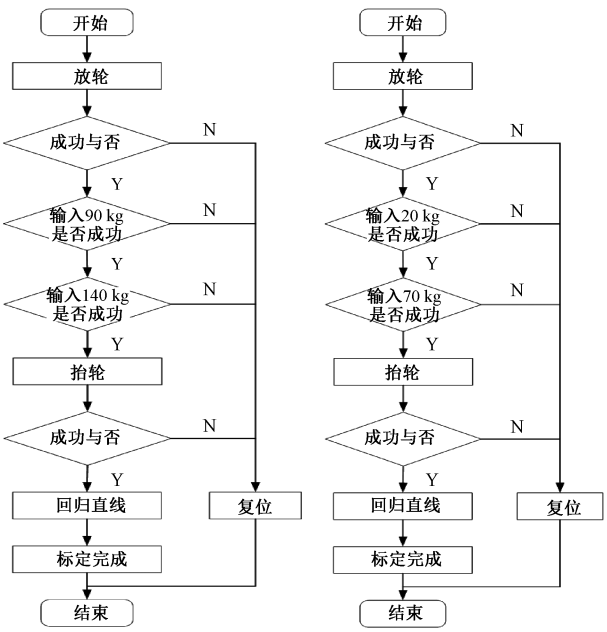
(e) Measurement interface



(f)查询界面
(f) Query interface

图 4　上位机可视化界面

Fig. 4　Visual interface of upper computer



(a) 垂直力标定
(a) Vertical force calibration

(b) 水平力标定
(b) Horizontal force calibration

图 5　传感器标定流程

Fig. 5　Sensor calibration flow chart

2.3　通信方式设计

由图 5 可知,上位机与下位机紧密联系,采用工业以太网通信方式,选择 TCP/IP 协议。需要对 PLC 和上位机的 IP 地址和端口号进行设定,数据传输可靠性由 TCP/IP 协议中的各个协议共同保证。

在完成下位机数据传输和监测各传感器状态的过程中,需要同时执行多个任务,读取速度、温度、力传感器的输出值、阀门和刹车信号等。用单线程不能完成这一任务,需要采用多线程设计思想,各线程之间互不干扰,其结构如图 6 所示。

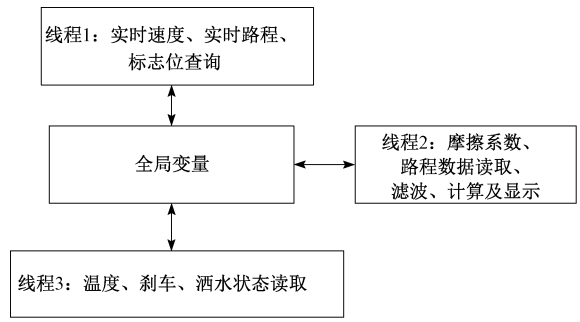


图 6　多线程设计

Fig. 6　Multi-threading design

2.4　滤波器设计

影响路面摩擦系数的因素有很多,除了路面自身的纹理结构不同会真实影响路面不同摩擦系数外,测量过程中由于车体自身机械结构的振动和其他不可控因素,会给测量带来一些干扰和噪声,为减小干扰得到可靠的测量数据,设计了巴特沃斯低通滤波器。根据冲激响应不变法,数字滤波器的阶跃响应为:

$$g(n)=g_a(t)\mid_{t=nT}=g_a(nT) \tag{5}$$

式中:T 为抽样周期。归一化二阶巴特沃斯低通滤波器模拟传递函数为:

$$H(s)=\frac{1}{1+\sqrt{2}+s^2} \tag{6}$$

设计在 3 dB 处截止频率为 50 Hz 的二阶巴特沃斯低通滤波器,因此用 $s/(2\pi\cdot 50)$ 代替 $H(s)$ 中的 s,再经过拉普拉斯变换和 Z 变换,取抽样频率 $f_s=200$ Hz,得到响应函数为:

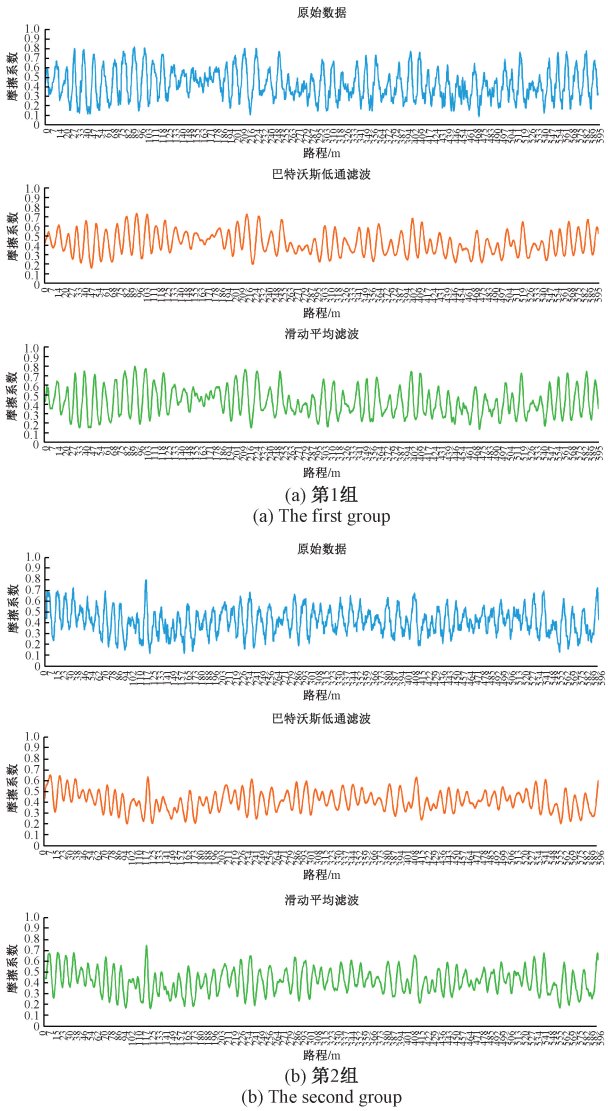
$$y(n)=0.007\ 438\ 34x(n-1)+0.007\ 010\ 38x(n-2)+1.822\ 732y(n-1)-0.837\ 180\ 72y(n-2) \tag{7}$$

式中:$x(n)$ 序列为原始数据;$y(n)$ 序列为滤波后的数据。

3　实验分析

在测试前检查了摩擦系数车的各个参数指标,包括电源、液压系统、胎压、电气系统、刹车等,准备妥当后,根据 ICAO 和民航局测试条件,在同一路面上以 96 km/h 的速度进行了多次测量,每次以 1 mm 水膜洒水测量了 600 m,选取其中得到的两组原始数据,如图 7 所示。

在获得原始数据的基础上,把原始数据按采集顺序作为 $x(n)$ 序列,滤波后的数据作为 $y(n)$ 序列,其中令 $y(0)=x(0)$,$y(1)=x(1)$。运用设计得到的二阶巴特沃斯低通滤波函数 $y(n)$ 对原始数据进行滤波,得到巴特沃斯低通滤波后的数据曲线,如图 7 所示,滤波后的数据显



(a) 第1组
(a) The first group

(b) 第2组
(b) The second group

图 7　实验测量数据

Fig. 7　Experimental measurement data

得平滑。

在滤波方法中常用到平均滤波,这里选择 10 个为一组进行滑动平均滤波,得到滑动平均滤波曲线,如图 7 所示。

在测量过程中垂直力传感器由蓄能器保压压力值不会发生突变,水平力传感器测量道面水平摩擦力,二者均是低频模拟信号。水平力传感器容易受到真实路面纹理的影响,在高速测量环境下机械传动结构的高频振动给水平力传感器带来扰动信号,需要进行滤除。对比原始数据曲线、巴特沃斯低通滤波后的曲线和滑动平均滤波后的曲线,可以看出巴特沃斯低通滤波效果好。

由于机场跑道使用时长的增加跑道会粘胶,根据民航相关要求,需要对跑道摩擦系数进行分段报告,有利于针对性清理跑道。测量时,软件系统根据设置的跑道测量长度自动平均分为 A、B、C 三段,分别对每段采集的摩擦系数进行求平均值,最后计算出摩擦系数总的平均值。本实验设置测量跑道距离为 600 m,每段 200 m,测得的两组平均值数据如表 2 所示。

表 2　摩擦系数分段平均值表

Table 2　Piecewise average table of friction coefficient

组别	分段	原始数据	巴特沃斯低通	滑动平均
1	*A* 段	0.463 7	0.461 5	0.462 9
	B 段	0.421 2	0.421 0	0.421 7
	C 段	0.401 7	0.404 8	0.402 9
	总平均值	0.428 7	0.428 8	0.428 6
2	*A* 段	0.404 7	0.407 6	0.404 8
	B 段	0.430 4	0.430 5	0.430 5
	C 段	0.408 0	0.405 2	0.407 5
	总平均值	0.413 3	0.414 4	0.413 4

对测量得到的数据进行分析可知,原始数据存在振动噪声干扰,滤波后数据更加平滑,但滤波前后摩擦系数平均值的变化不大。与现有摩擦系数车测量结果比较,计算总平均摩擦系数值标准差在±0.02,重复性良好,符合民航特种设备相关要求。

4　结　论

本文设计了摩擦系数车测量系统的下位机控制系统和上位机软件,由于上位机与下位机的通信和数据交互频繁、传输数据量大,选择工业以太网通信采用 TCP/IP 协议,运用多线程思想完成了稳定可靠的通信设计。测量过程中由于外部干扰的存在,设计了低通数字滤波器对采集的数据进行滤波处理,得到可靠的测量数据,经多次测量实验测量系统重复性良好,验证了测量系统的稳定性和可靠性。

参考文献

[1] 程景萌. 机场道面摩擦因数测量车研究与分析[D]. 天津:河北工业大学,2011.
CHENG J M. Research and analysis on coefficient test vehicle for airport runway[D]. Tianjin: Hebei University of Technology,2011.

[2] IWANOWSKI P, BLACHA K, MARIUSZ W. Review of modern methods for continuous friction measurement on airfield pavements[C]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2018, 356.

[3] SAHAR S, SOMAYEH N, ALIREZA B, et al. Lateral coefficient of friction for characterizing winter road conditions[J]. Canadian Journal of Civil Engineering,

2015,43(1):73-83.

[4] ASTM E2100-04 (2015). Standard Practice for Calculating the International Runway Friction Index (Withdrawn 2019)[S]. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

[5] SHI X D, SHI SH W, LI J L, et al. The detection of pavement friction coefficient and the research of its evaluation methods[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2015.

[6] 江东,赵彦超,王德玉. 基于小波分析的公路平整度测量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 17-24.
JIANG D, ZHAO Y CH, WANG D Y. Research on highway flatness measurement based on wavelet analysis[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument,2020,34(1):17-24.

[7] KOGBARA R B, MASAD E, ANUPAM K, et al. Grip Tester measurements and texture-friction relationship[C]. Advances in Materials and Pavement Performance Prediction: Proceedings of the International AM3P Conference, 2018.

[8] PU Z Y, LIU C L, SHI X M, et al. Road surface friction prediction using long short-term memory neural network based on historical data[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2020(1):1-12.

[9] ZUNIGA-GARCIA N, PROZZI J A. High-definition field texture measurements for predicting pavement friction[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2019, 2673(1): 246-260.

[10] KHALEGHIAN S, EMAMI A, TAHERI S. A technical survey on tire-road friction estimation[J]. Friction, 2017, 5(2):123-146.

[11] 赵鸿铎,伍梦竹,吴世涛. 沥青道面摩擦系数随水膜厚度的变化规律[J]. 中国民航大学学报,2015,33(2): 47-52.
ZHAO H D, WU M ZH, WU SH T. Variation of asphalt pavement friction coefficient with change of water film thickness[J]. Journal of Civil Aviation University of China,2015,33(2):47-52.

[12] 朱企明,张文纲. 跑道摩擦系数测试车的校正原理[J]. 民航学报,2020,4(6):14-17.
ZHU Q M, ZHANG W G. Calibration principle of runway friction tester[J]. Journal of Civil Aviation, 2020,4(6):14-47.

[13] 赵植,胡骁杰. 机场跑道摩擦系数测试车自动标定系统的研究[J]. 军民两用技术与产品,2018 (22):213.
ZHAO ZH, HU X J. Research on automatic calibration system of airport runway friction coefficient test vehicle[J]. Dual Use Technologies & Products, 2018(22):213.

[14] 单江. 摩擦系数车标定方法与实验研究[D]. 天津:河北工业大学,2011.
SHAN J. Research on the calibration method and experimental study of friction coefficient tester[D]. Tianjin:Hebei University of Technology,2011.

[15] 杨朝阳. 机场跑道摩擦系数测试车外部振动影响因素研究[D]. 天津:中国民航大学,2013.
YANG CH Y. Research on external vibration influencing factors of airport runway frictional coefficient measure vehicle[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2013.

[16] 高建树,杨朝阳. 基于 AMESIM 的机场跑道摩擦系数测试车振动研究[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(11):266-269.
GAO J SH, YANG CH Y. On vibration of airport runway friction coefficient test vehicle based on AMESIM. Computer Applications and Software,2013,30(11):266-269.

[17] 秦浪朝. 路面摩擦系数的检测与评价方法的研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2015.
QIN L CH. The detection of pavement friction coefficient and the research of its evaluation methods[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2015.

[18] 赵雪涛. 公路路面摩擦系数检测与评价方法研究[J]. 交通世界,2019(23):56-58.
ZHAO X T. Research on the method of testing and evaluating the friction coefficient of highway pavement[J]. TranspoWorld,2019(23):56-58.

[19] 周围,张思祥,郭经泽,等. 飞机跑道摩擦系数测试车软件设计[J]. 测控技术,2010,29(4):78-81.
ZHOU W, ZHANG S X, GUO J Z, et al. Design of software for airport friction coefficient measuring vehicle[J]. Measurement & Control Technology, 2010, 29(4):78-81.

[20] NIU Y D, ZHANG S X, TIAN G J, et al. Estimation for runway friction coefficient based on multi-sensor information fusion and model correlation[J]. Sensors, 2020, 20(14):3886.

作者简介

周围,分别在 2004 年、2007 年和 2010 年于河北工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为河北工业大学副教授,主要研究方向为测试计量技术与仪器。
E-mail: zhouwei19800323@163.com

Zhou Wei received his B. Sc. , M. Sc. and Ph. D. all from Hebei University of Technology in 2004, 2007 and 2010, respectively. Now he is an associate professor at Hebei University of Technology. His main research interests include testing and measuring technology and instruments.

田广军, 2018 年于河北工业大学获得学士学位,现为河北工大学硕士研究生,主要研究方向为机场道面摩擦因素检测。
E-mail: tgj1711058027@ 163. com

Tian Guangjun received his B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2018. Now he is a M. Sc. candidate at Hebei University of Technology. His main research interest includes the detection of friction factors on airport pavement.

刘伟玲(通信作者),分别在 1995 年和 1998 年于河北工业大学获得学士学位和硕士学位,2006 年于天津大学获得博士学位,现为河北工业大学副教授,主要研究方向为锂电装备及关键技术研究、新型感知与控制系统。
E-mail: lwl@ hebut. edu. cn

Liu Weiling (Corresponding author), received B. Sc. and M. Sc. from Hebei University of Technology in 1995 and 1998, Ph. D. from Tianjin University in 2006, respectively. She is now an associate professor at Hebei University of Technology. Her main research interests include lithium-ion equipment and key technology research, new perception and control system.