

一种机动车火花熄灭器的自动检测系统设计

韩博文 孙四通

(青岛科技大学自动化与电子工程学院 青岛 266061)

摘要:为解决火花熄灭器检测中人工称量活性炭效率低、无法在线称量等问题,基于国家标准 GB13365—2005,提出了一种机动车火花熄灭器的自动检测系统设计。系统设计了自动称重装置,可实现检测过程中活性炭重量的自动实时称重。对于称重过程中气流造成的误差,采用软件方式进行实时自动校准,首先利用卡尔曼滤波算法对训练数据进行去噪,然后利用三次样条插值对降噪后数据进行拟合,构造误差补偿模型。实际在线测试结果表明,系统补偿后的称重误差可控制在1g以内,满足了实际使用场景的需求。

关键词:火花熄灭器;检测系统;自动校准;自动化检测

中图分类号: TP23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

Design of automatic detection system for automobile spark extinguisher

Han Bowen Sun Sitong

(School of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: To solve the problems of low efficiency of manual weighing of activated carbon and inability of online weighing in spark extinguisher detection, based on the national standard GB13365—2005, this paper proposes a design of an automatic detection system for motor vehicle spark extinguishers. The system is designed with an automatic weighing device, which can realize the automatic real-time weighing of activated carbon weight during the testing process. For the errors caused by airflow during the weighing process, this paper adopts a software approach for real-time automatic calibration. Firstly, the Kalman filter algorithm is used to denoise the training data, and then the third spline interpolation is used to fit the noise reduction data to construct the error compensation model. The actual online test results show that the weighing error of this system can be controlled within 1 g after compensation, which meets the requirements of practical use scenarios.

Keywords: spark arrester; detection system; automatic calibration; automatic detection

0 引言

为预防机动车排气管在易燃、易爆区域喷出火星导致火灾的情况,我国规定进入易燃易爆场所和运输易燃易爆品的机动车必须安装符合国家标准 GB13365—2005 检测的火花熄灭器^[1]。但目前市场中的熄灭器产品质量参差不齐,为防止假冒伪劣产品危害公共安全,对该类产品进行有效的合格性检验十分必要。

1980年,美国汽车工程师学会(society of automotive engineers,SAE)制定了SAE J350标准《Spark Arrester Test Procedure for Medium Size Engines》,规定使用活性

炭颗粒模拟机动车排气管喷出的火星,以检验熄灭器的火花熄灭性能。测试时将熄灭器安装于试验设备进气管道末端,由鼓风机向进气管道供气,使用炭喷射器将炭颗粒喷入进气管道。熄灭器排出的炭颗粒落入炭收集器中,然后通过收集器中和试验时喷入进气管道的活性炭重量计算确定熄灭器的火花熄灭性能。

1992年,我国实施了GB13365—1992标准,即《机动车排气火花熄灭器性能要求和试验方法》,规定熄灭器测试方法为在黑暗处将熄灭器装在喷出集束火花的发动机排气管上,观察是否仍有火花喷出。2005年,我国参照美国SAE J350标准,发布并实施了GB13365—2005《机动车

排气火花熄灭器》，以替代原有的 GB13365—1992 标准，标准中采用活性炭方式检验熄灭器火花熄灭性能。

基于 GB13365—2005 标准，为熄灭器测试设备文献[2]设置了一种均速供炭装置，以保证检测时供炭的均匀性，并设计了两条输送管道，两条管道上分别安装有两个不同量程的孔板流量计，以满足测量不同排量机动车检测用流量的需求，并采用智能流量积算仪进行温度和压力补偿，提高流量测量精度。

另外，文献[3-4]提出了一种熄灭器的自动测试系统设计，实现了对检测流量和时间的自动控制，能够实时采集检测参数并传给控制系统。其中，文献[4]的控制系统与加料器间存在电气连接，使系统可以控制活性炭的加料时间，同时还设置了温度变送器测量试验管道内的温度。

目前已有文献所设计的车用熄灭器测试装置均需人工称量熄灭器排出或挡住的活性炭重量以检验熄灭器的合格性。为解决这一问题，本文为熄灭器检测系统设计了一种自动称重装置，使检测结束时系统能够自动采集熄灭器排出的活性炭重量并进行合格性判断，在检测过程中能够对排出的活性炭实时称重，绘制和记录重量变化曲线。但称重过程中风机产生的气流会对结果造成影响，引入误差，因此需要对结果进行修正。

对于气流冲击称重装置造成的扰动问题，文献[5-7]采用硬件方式加以解决，利用分流对冲和扩容降速原理对气流进行降速，减小气流对称重装置的冲击。文献[8-9]采取软件方式减小这一误差。其中，文献[8]通过建立风速和质量归一化偏差间的线性关系模型对气流扰动下的称重值进行校正。文献[9]先采用一阶差分法去除粗大误差，再使用加权均值滤波进行去噪，然后采用线性插值进行线性化处理，最后将线性化处理后的数据划分为多个区间，为每个区间设置一个补偿系数进行校正得到最终的称重结果。

由于采用硬件方式消除气流冲击需要对原有活性炭收集装置的结构进行重新设计，为缩短研发周期、降低成本，本文通过建立管道流量和称重误差的关系模型，利用软件方式实现称重值的校准。

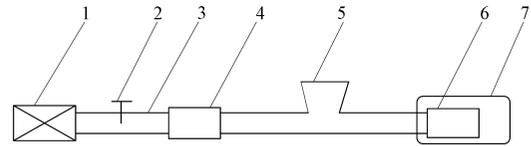
本文系统的信噪比较小，为减少在线校正的时间和降低模型复杂度，本文采用先滤波后插值的方式建立称重校准模型。首先利用卡尔曼滤波算法对训练称重值进行去噪处理，然后再利用三次样条插值对去噪后的训练数据进行拟合，构造流量—称重误差补偿模型，最后利用模型进行在线实时的误差校准，以提高称重准确度。

1 系统硬件

1.1 国家标准 GB13365—2005

国家 GB13365—2005 标准《机动车排气火花熄灭器》中规定，熄灭器火花熄灭性能的测试装置设计如图 1 所示。

待检测火花熄灭器应安装在试验管道的末端，检测开



1—通风机；2—调节阀；3—试验管道；4—空气流量计；5—活性炭颗粒输入入口；6—待检测熄灭器；7—活性炭颗粒收集器

图 1 GB13365—2005 标准中的测试装置示意图

始后启动通风机，将符合标准的 200 g 活性炭颗粒倒入输入入口，持续 15 min，然后收集火花熄灭器出口处的活性炭颗粒称重，若收集到的活性炭颗粒重量不超过倒入总重量的 20% 则为合格。

检测时的空气流量根据熄灭器适用车型的发动机排量和额定转速确定，可通过调节阀调节试验管道内的空气流量。

1.2 硬件设计

基于标准 GB13365—2005，本文设计的火花熄灭器测试装置如图 2 所示。系统采用上、下位机结构实现检测过程中的自动控制和数据校准，其中上位机为管理计算机，下位机为控制计算机。工作时，先由管理计算机完成前台接单，并下发检测任务至控制计算机。控制计算机开启检测，并对称重过程中称重误差进行在线校准，然后给出检测报告并送至管理计算机存档。

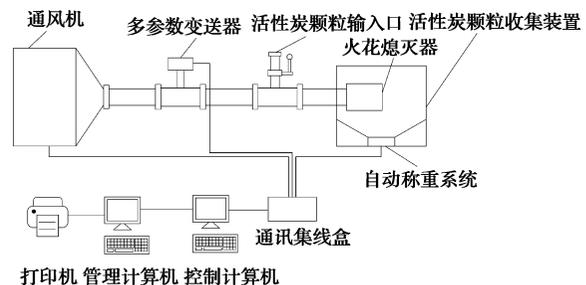


图 2 熄灭器测试装置示意图

为实现自动检测功能，该装置除标准中要求的基本部件外还增加了多参数变送器、称重传感器、通信接线、控制和管理计算机、打印机等装置。其中，管理计算机用于录入基本信息——即熄灭器信息和用户信息，下达检测任务和生成检测报告。控制计算机用于自动控制检测设备和实时采集数据。

涡街流量计具有结构简单、稳定可靠、维护方便、寿命长的优点^[10-11]。设备的多参数变送器由涡街流量计和压力传感器集成，可测量管道内空气的体积流量和静压值，并将测量数据实时传送至计算机。

综合量程、成本、精度等因素，自动称重系统选用电阻应变式铝制平行梁称重传感器^[12-13]和数据传输装置集成，可自动对活性炭颗粒进行称重，并将数据传送给计算机。

此外，通风机采用支持 MODBUS RTU 协议的变频

离心风机,用于控制管道流量。相较于调节阀控制流量,具有更好的节能效果。在录入灭火器信息后,管理计算机可根据灭火器型号从参数库中匹配对应的风机转速下发至控制计算机。

控制计算机与各设备之间的通信采用 MODBUS RTU 协议和 RS485 通信接口,使用总线方式连接,如图 3 所示。



图 3 设备 RS485 通信接线

接收到检测任务后,控制计算机可开启风机和计时进入自动检测流程,期间不断采集流量、压力、风机转速、活性炭重量并绘制变化曲线。检测时间达到 15 min 时系统自动控制风机停转,并根据此时的活性炭称重值做出合格性判断,同时一键完成检测信息存档和检测报告打印。测试装置实物如图 4 所示。



图 4 测试装置实物

2 系统软件

2.1 软件功能

为更好地配合硬件系统,本文设计了配套的软件,该软件可实现对设备检测流程的自动控制、自动参数采集存储、产品质量评价等功能,最终将评价结果和过程参数曲线显示在操作界面中,并打印检测报告。

由于检测过程中受管道内气流冲击的影响,称重传感器的称重值存在一定误差,本文设计了一种校准方法,可实现称重值的在线实时校准,从而提高测量准确度。

2.2 主程序设计

运行检测前,首先对系统进行初始化,然后在管理计算机程序中录入用户信息和灭火器类型,系统根据灭火器型号自动匹配检测参数。控制计算机接收到检测参数后,可启动通风机并进入 15 min 倒计时。

倒计时完成后,控制计算机程序将此时的流量、压力、通风机转速和称重值发送至管理计算机存档,同时向风机发出停转指令,并通过称重值分析得到检测结果,将检测结果发送至管理计算机。若检测过程中发生意外情况,可手动停止检测。检测结束后,管理计算机会在窗口中显示出灭火器检测结果(合格/不合格),并一键自动打印检测报告。主程序的流程如图 5 所示。

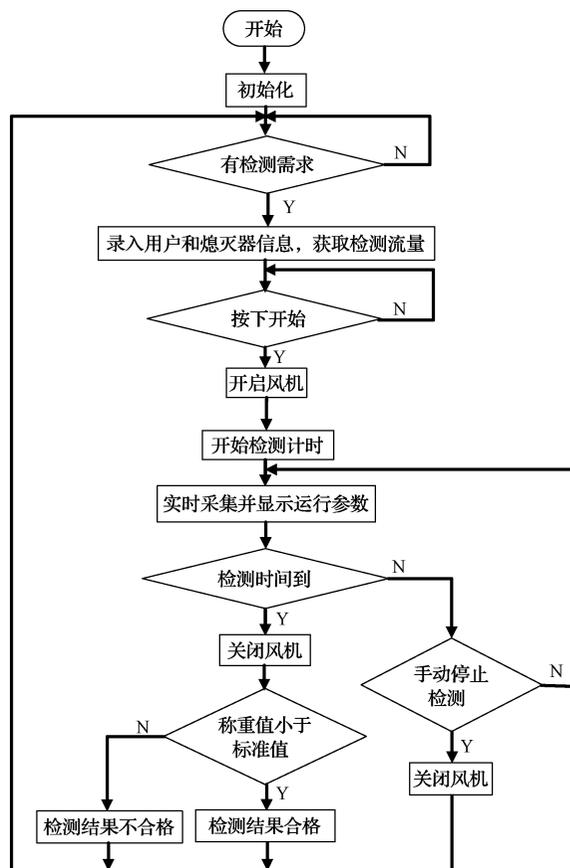


图 5 主程序流程

2.3 称重值校准程序设计

1) 检测流量的确定

灭火器检测时所用的管道流量由适用车型发动机的排量和额定转速确定:

$$q_v = V_s \times n_n \times 60 \times 10^{-3} \quad (1)$$

式(1)由机动车发动机扫气量计算公式^[14]简化得到,其中 q_v 为测试用管道流量, V_s 为发动机排量, n_n 为发动机额定转速。

对灭火器适用车辆的发动机参数进行统计,再按照上式计算可确定灭火器检测所需的管道流量,并将流量对应的风机转速记入系统数据库,作为进行测试时的自动参数调用依据。

2) 数据采集

由于管道内的气流冲击引起称重测量误差,为对称重值进行有效校准,需先确定管道流量对称重值的影响,然后对称重值进行补偿。本文采用插值法对称重值进行校准,为训练插值曲线,进行数据采集方式如下:在称重装置上分别放置 0(即空载), 10, 20, ..., 200 g 砝码,然后在管道流量分别为 57、90、130、170、210、255、295、335、370 m³/h 时进行称重,计算称重值与真实值之间的误差,并保存作为拟合数据。图 6 所示为放置 0、60、100 g 砝码时,管道流量和称重误差值随时间变化的关系。

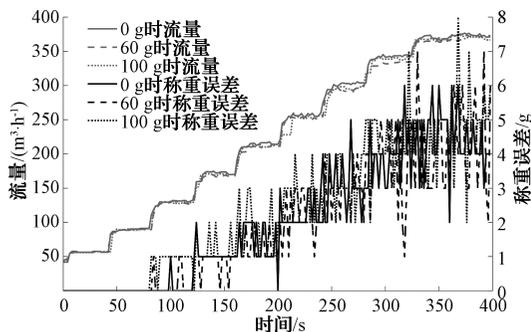


图6 流量与称重误差关系

由图6可知,当设备运行时,称重值出现明显振荡,且当流量越大时,震荡越剧烈,这可能与称重装置中空气流态不稳有关。由于称重信号具有较大噪声,为提高校准后的精度,本文先对校准前的数据进行滤波,再利用滤波数据进行插值拟合。

3) 称重滤波

本文采用卡尔曼滤波算法进行称重信号去噪^[15-18],计算公式如下:

$$x(t|t-1) = x(t-1|t-1) \quad (2)$$

$$P(t|t-1) = P(t-1|t-1) + Q \quad (3)$$

$$K(t) = P(t|t-1)[P(t|t-1) + R]^{-1} \quad (4)$$

$$x(t|t) = x(t|t-1) + K(t)[z(t) - x(t|t-1)] \quad (5)$$

$$P(t|t) = [1 - K(t)]P(t|t-1) \quad (6)$$

式中: $x(t|t-1)$ 、 $x(t|t)$ 分别为 t 时刻的称重预测值和估计值,设初始值 $x(0|0)$ 与同时刻观测值相同; $z(t)$ 为 t 时刻称重观测值; $P(t|t-1)$ 、 $P(t|t)$ 分别为预测误差和估计误差的方差,设初始值 $P(0|0)$ 为1; Q 为过程噪声的方差,凭经验取0.01; R 为测量噪声的方差,由于设备称重装置量程为3 kg,传感器部分精度为0.03%,变送器部分精度为0.000 3%,可得最大总误差为0.909 g,方差为0.826,因此取 $R=0.826$; $K(t)$ 为 t 时刻卡尔曼滤波增益。

当管道中气体流量为130、210、370 m³/h,称重装置上载重为0、60、100 g时,滤波前、后称重误差的对比如图7~9所示。

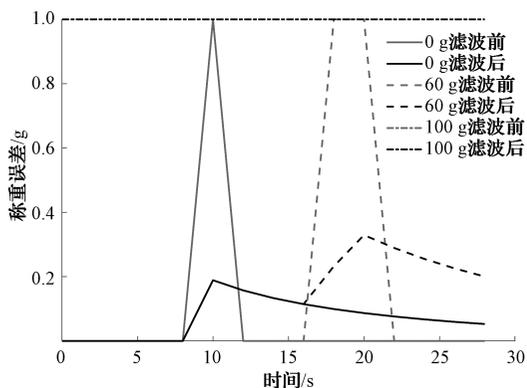


图7 流量130 m³/h时滤波前、后称重误差对比

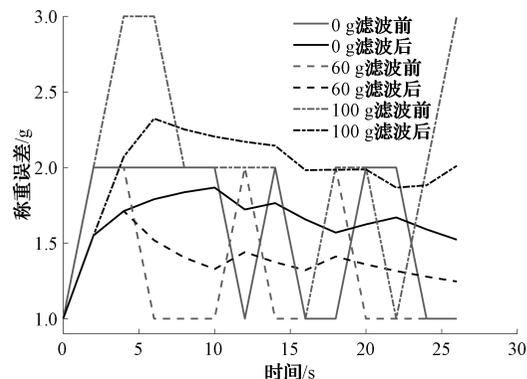


图8 流量210 m³/h时滤波前、后称重误差对比

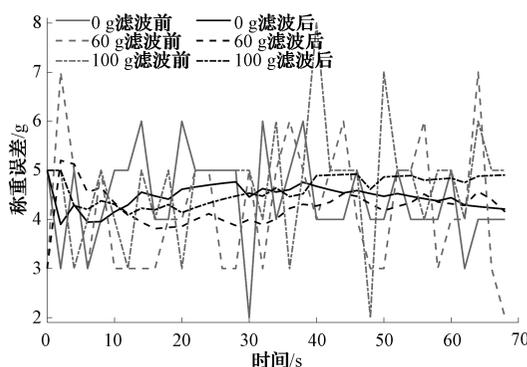


图9 流量370 m³/h时滤波前、后称重误差对比

由图7~9可知,滤波后的称重误差值振荡幅度明显减小,说明滤波可有效降低振荡带来的误差。为确定称重误差与称重装置载重的关系,绘制各流量下称重误差与砝码重量的关系,如图10所示。

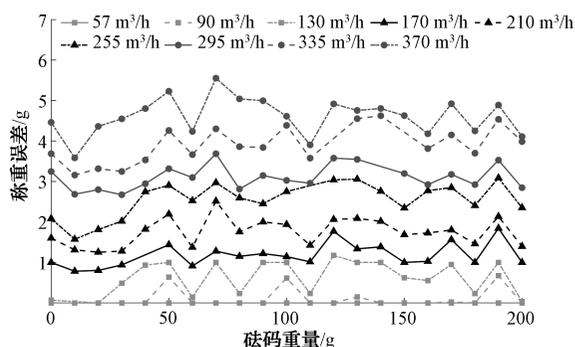


图10 各流量下称重误差与砝码重量的关系

从图10可看出,随着空气流量越高,对称重装置冲力越强,称重误差也越大。不同流量下,称重误差随砝码重量的变化趋势具有一定的相似性。因设备运行时称重误差值具有较大噪声,图中的每个点的称重误差均由对应流量和砝码重量下,对一段时间内的称重误差采样值取平均得到。由于这种做法无法完全消除噪声对结果的影响,因

此得到的不同流量下称重误差随砝码重量变化的关系会存在一定差异,但这些差异均被控制在噪声的振荡范围内。

为简化校准曲线,本文忽略称重值对误差的影响,只考虑流量这一个变量对称重的补偿。

4) 称重校准

本文采用三次样条插值建立称重补偿模型,该方法简单易实现、稳定性好^[19],因其插值函数的二阶导数连续,可保证曲线的光滑性^[20-23]。设 $[a, b]$ 为插值区间,待插值流量—称重误差函数为 $f(x)$, $a=x_0 < x_1 < \dots < x_n=b$ 为插值节点。若函数 $S(x)$ 满足以下条件,称函数 $S(x)$ 为关于节点 x_0, x_1, \dots, x_n 的三次样条函数^[24-26]。

- (1) $S(x)$ 在每个子区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 上是三次多项式。
- (2) $S(x)$ 在 $[a, b]$ 上具有连续的二阶导数。
- (3) $S(x_i) = f(x_i)$ 。

由定义可知, $S(x)$ 在每两个相邻插值点组成的区间内为三次函数,所以 $S(x)$ 的二阶导数在每一个子区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 上都是一次函数(即线性函数),设:

$$\frac{S''(x) - S''(x_i)}{S''(x_{i+1}) - S''(x_i)} = \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (7)$$

$S(x)$ 在 $x = x_i$ 处的泰勒展开式:

$$S(x) = S(x_i) + S'(x_i)(x - x_i) + \frac{S''(x_i)}{2}(x - x_i)^2 +$$

$$\frac{S'''(x_i)}{6}(x - x_i)^3 \quad (8)$$

依据式(7)求得 $S''(x)$ 和 $S'''(x)$,并令 $M_i = S''(x_i)$, $h_i = x_{i+1} - x_i$,代入式(8),得:

$$S(x) = S(x_i) + S'(x_i)(x - x_i) + \frac{M_i}{2}(x - x_i)^2 +$$

$$\frac{M_{i+1} - M_i}{6h_i}(x - x_i)^3 \quad (9)$$

令 $x = x_{i+1}$ 求得 $S'(x_i)$ 的表达式,并代入式(9),令插值点处 $S(x_i) = f(x_i) = y_i$,可得:

$$S(x) = y_i + \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} + \frac{M_{i+1} + 2M_i}{2}h_i \right) (x - x_i) +$$

$$\frac{M_i}{2}(x - x_i)^2 + \frac{M_{i+1} - M_i}{6h_i}(x - x_i)^3 \quad (10)$$

设置边界条件为自然边界条件:

$$S''(x_0) = S''(x_n) = 0 \quad (11)$$

求解函数中未知参数,得到简化方程为:

$$S(x) = a(x - x_i)^3 + b(x - x_i)^2 + c(x - x_i) + d \quad (12)$$

分别取砝码重量 0, 20, ..., 200 g, 流量 57, 130, 210, 295, 370 m³/h 的采样点建立插值补偿模型。插值模型各区间及对应参数取值如表 1 所示。模型的插值函数曲线如图 11 所示。

表 1 插值函数参数

插值区间	a	b	c	d
[57, 130]	3.917×10^{-7}	1.935×10^{-18}	4.600×10^{-3}	0
[130, 210]	-4.544×10^{-7}	8.579×10^{-5}	1.090×10^{-2}	4.882×10^{-1}
[210, 295]	2.705×10^{-7}	-2.327×10^{-5}	1.590×10^{-2}	1.674
[295, 370]	-2.032×10^{-7}	4.572×10^{-5}	1.780×10^{-2}	3.020

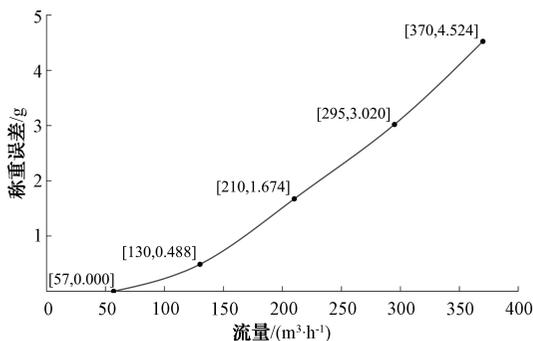


图 11 插值曲线

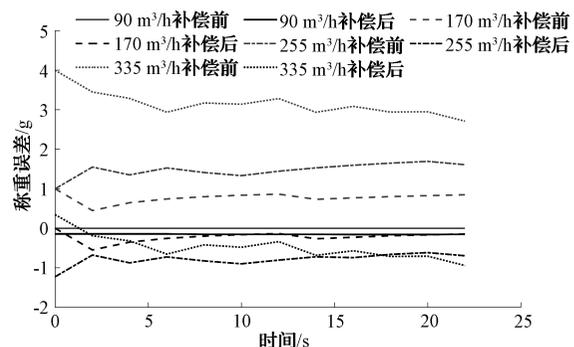


图 12 放置砝码 10 g 时补偿前后误差对比

5) 实验验证

分别取砝码重量 10、50、130 g, 流量 90、170、255、335 m³/h 对插值曲线进行验证,得到的称重补偿前、后的误差曲线如图 12~14 所示。

由图 12~14 可知,本文提出的插值补偿法可有效减小称重误差,并在流量越高时校准效果越明显。不过由于

在滤波时设定称重估计值初值等于同时刻观测值,导致补偿后误差在滤波开始时偏高,之后会随时间逐步降低趋于稳定。稳定后的误差均保持在 1 g 内,能够满足实际使用的要求。

图 15 所示为测量软件的检测界面。界面左边用于用户信息和灭火器信息的输入,以及控制检测流程的开始、

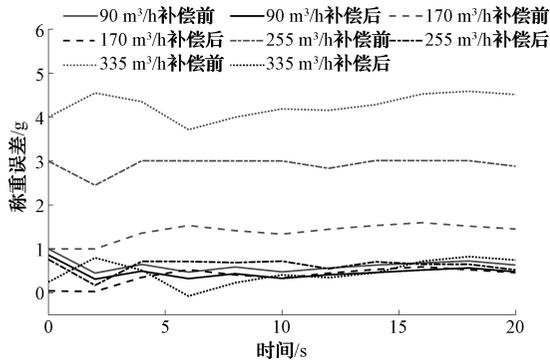


图 13 放置砝码 50 g 时补偿前后误差对比

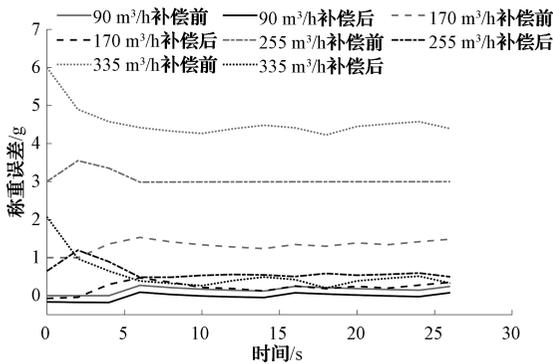


图 14 放置砝码 130 g 时补偿前后误差对比

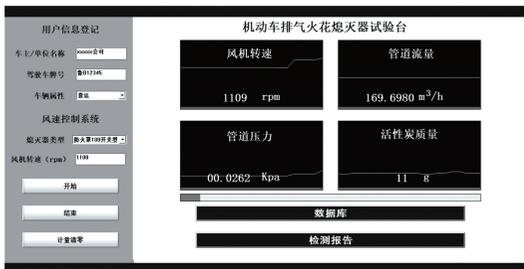


图 15 程序检测界面

意外情况下的手动停止、称重值清零操作。右侧实时显示检测过程中的参数值和变化曲线。图 16 所示为检测报告的生成界面。



图 16 检测报告界面

3 结论

本文基于国家标准 GB13365—2005 中对机动车火花熄灭器性能测试的规定,提出了一种火花熄灭器的自动测试系统。系统采用上、下位机计算机结构自动控制的方式,可实现对活性炭的自动称重、误差校准、采集、存储和打印检测报告等功能。对于检测过程中由于管道气流造成的称重误差,系统采用卡尔曼滤波算法和三次样条插值进行补偿曲线的拟合,并对误差进行在线实时校准,最后将自动称重误差控制在了 1 g 以内,满足了实际使用的需求。系统目前只能进行开环控制,还不能应对更复杂的测试场景,系统的闭环控制改进也将是未来课题组的研究方向之一。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 机动车运行安全技术条件: GB7258—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [2] 何大军, 傅汉安, 龚国彬, 等. 机动车排气火花熄灭器测试设备: 201110347852. 4[P]. 2011-10-29.
- [3] 王明文, 王德祥, 张朝忠, 等. 机动车排气火花熄灭器检测方法 & 检测试验台: 200810158138. 9[P]. 2011-03-30.
- [4] 姜琪, 阮裕铭, 胡刚翔, 等. 一种火花消除器测试装置: 201220348644. 6[P]. 2013-03-13.
- [5] 宋涛, 孟晓军, 边炳传, 等. 分流对冲与多级扩容式自动集沙仪集沙盒的设计参数分析[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(12): 83-87.
- [6] 刘海洋. 基于无线传感网络的土壤风蚀监测系统研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [7] 周瑶. 纤式风沙监测系统设计与关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- [8] 武逸凡. 基于 LabVIEW 的热风干燥控制系统及青花椒变温干燥工艺研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022.
- [9] 刘春明. 卷烟机梗签剔除流量在线测定装置的设计与实现[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [10] 张丽. 电子技术下天然气流量仪表的选型研究[J]. 电子技术与软件工程, 2014, 49(23): 113.
- [11] 陈忠革. 涡街流量计的选型与应用[J]. 船电技术, 2019, 39(1): 61-64.
- [12] 徐建华, 杨祖班. 高精度衡器用称重传感器选型[J]. 衡器, 2013, 42(1): 39-41.
- [13] 李更新. 称重传感器的选型及影响因素[J]. 衡器, 2019, 48(12): 45-48.
- [14] 董雪飞, 赵长禄, 张付军, 等. 对置活塞二冲程发动机耗气特性研究[J]. 内燃机工程, 2016, 37(6): 216-221.
- [15] 孟文晔. 包装过程称量信号处理方法研究[J]. 包装工程, 2022, 43(9): 184-188.
- [16] 卢勇, 卢会国, 蒋娟萍, 等. 称重雨量数据处理卡尔曼

- 滤波应用[J]. 气象科技, 2017, 45(4): 590-595.
- [17] 张华, 刘建军, 王丽佳, 等. 自适应核相关滤波的运动目标跟踪[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(5): 21-25.
- [18] 孙亮亮, 付宏才, 甘义权, 等. 基于 MATLAB 仿真的电子皮带秤信号滤波研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(13): 89-93.
- [19] 贺红林, 许佳豪, 周战洪, 等. 压阻式压力传感器温度误差的插值补偿方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(12): 1-7.
- [20] 王姝敏, 乔爱民. 燃气灌装秤的三次样条插值误差补偿法[J]. 广东石油化工学院学报, 2017, 27(4): 64-66.
- [21] 崔永俊, 张强. 基于激光三角法的火炮身管内径测量系统设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(9): 26-30.
- [22] 李慧敏, 邓铭, 刘璞凌, 等. 半闭环数控机床几何与热复合的定位误差建模与补偿[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(1): 123-128.
- [23] 王冰冰, 李淮江. 基于三次样条插值的硅压阻式压力传感器的温度补偿[J]. 传感技术学报, 2015, 28(7): 1003-1007.
- [24] 崔浩, 舒朝君, 王亚. 基于三次样条插值的盐度监测控制装置的温度补偿算法[J]. 仪表技术与传感器, 2016(6): 88-91.
- [25] 王文博, 马琳, 王永鹏, 等. 基于三次样条曲线插值的压力传感器温度补偿研究[J]. 机电信息, 2020(23): 33-35.
- [26] 杨继森, 张迪, 卢渝, 等. 时栅位移传感器误差动态采样与补偿模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 9-18.

作者简介

韩博文, 硕士研究生, 主要研究方向为测控技术与仪器、控制工程。

E-mail: 987458342@qq.com

孙四通, 副教授, 主要研究方向为测控技术与仪器、控制工程、物联网工程应用。