

基于 CFO 器件的卷烟吸阻检测装置设计

邹诚志¹, 何爱民², 牛小民³, 曹昌清⁴, 赵树弥^{1*}, 朱震¹, 吴晓松¹, 王安¹

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院应用技术研究所, 安徽合肥 230088; 2. 河北中烟工业有限责任公司, 河北石家庄 050051; 3. 西北烟草质量监督检测站, 甘肃兰州 730030; 4. 上海市烟草质量监督检测站, 上海 200082)

摘要 针对卷烟吸阻测量过程中临界流量孔件(CFO 器件)生成的高速微小气体流量产生的压差受到环境温湿度影响, 难以准确测量的问题, 设计了由进样模块、标准包覆模块、电路系统、气路系统等组成的卷烟吸阻检测装置, 用于精密检测 CFO 器件生成的高速微小气体流量产生的压差。根据卷烟吸阻测量标准的流量要求(17.5±0.3) mL/s, 采用 CFO 器件产生标准微小气体流量 17.5 mL/s 作用于烟蒂端。基于 STM32 的核心控制板, 采用压差传感器对测量管路压降精密检测, 使用温度传感器和湿度传感器对环境温湿度进行实时监测。通过标准棒修正由差压传感器本身带来的误差以及试验环境中温湿度波动带来的误差。结果表明, 卷烟吸阻检测装置实现了测量过程中管路压降的精密测量和温湿度影响的修正, 测量精度达 5 Pa, 比现有测量标准要求提高了 1 倍。

关键词 卷烟吸阻; 压降检测; 气体微流量; CFO 器件

中图分类号 TS 43 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)16-0200-05

Design of Cigarette Draw Resistance Detection Device Based on CFO Device

ZOU Cheng-zhi¹, HE Ai-min², NIU Xiao-min³ et al (1. Institute of Applied Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230088; 2. China Tobacco Hebei Industrial Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050051; 3. North-west Tobacco Quality Supervision and Test Station, Lanzhou, Gansu 730030)

Abstract In the measuring process of cigarette draw resistance, a pressure difference was produced by high speed gas micro-flow which was generated by a critical flow orifice device (Critical flow orifice device, CFO device) and was affected by the temperature and humidity of the environment, it was difficult to accurately measure. A cigarette draw detection device for high precision detecting the pressure difference of CFO device generated was designed. It included sampling module, standard coating module, circuit system, pneumatic system and gas path system. According to the flow measurement standard of cigarette draw resistance requirements (17.5 + 0.3) mL/s, the CFO device was used to generate the standard gas micro-flow 17.5 mL/s in cigarette end. Based on the core control panel of STM32, the pressure sensor was used to precisely detect the pressure drop of the measurement pipeline, and the temperature and humidity sensors were used to monitor the environmental temperature and humidity in real time. The error of the differential pressure sensor in itself and the fluctuation of temperature and humidity in the experimental environment were corrected by some standard rods. The cigarette draw resistance detection system was tested. The results showed that the detection device of cigarette draw resistance realized the precise measurement of pipeline pressure drop and the correction of temperature and humidity influence during the measurement process, and the measurement accuracy reached 5 Pa. That's twice as much as the existing measurement standards.

Key words Cigarette draw resistance; Pressure drop test; Gas micro-flow; CFO device

卷烟对于吸烟者来说已是生活中的必需品, 但为吸烟者的健康考虑, 把控卷烟质量尤其重要, 因此, 研究卷烟检测技术, 提高卷烟质量有着重要意义^[1]。卷烟吸阻是衡量卷烟质量的一项重要物理指标, 其变化不仅影响卷烟的吸味, 同时对焦油释放量有着直接影响^[2-3]。国标和 ISO 标准均规定了卷烟吸阻的测量原理: 将样品烟蒂端放在测量设备中 9 mm, 在标准条件下维持样品输出端气体体积流量为 (17.5 ± 0.3) mL/s 时样品两端的压差^[4-6]。

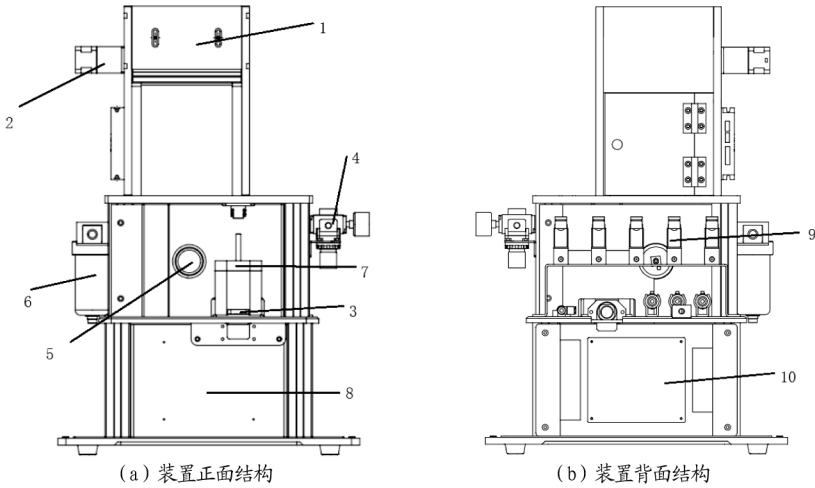
对卷烟吸阻等指标检测通常使用综合测试台, 但综合测试台的测量方式具有局限性。一些研究者通过对综合测试台进行分析改进, 使其更好地满足卷烟企业生产时对吸阻测量的要求。代秀迎等^[7]在《综合测试台中吸阻/压降测量单元的优化改进》中通过改进抽吸管路测试吸阻的影响规律以调整抽吸管路长度, 有效提高了吸阻测量的稳定性及准确性。陈丞^[8]在原设备的基础上, 重新设计加工了送料斗、圆周长度单元、吸阻通风度单元、硬度单元的部分零部件, 改造

后的综合测试台可满足测量 5.4 mm 直径细支卷烟及滤棒的检测需求。张吉卫等^[9]基于 DSP 的卷烟吸阻测量仪自动分拣装置开发, 降低检测人员劳动强度, 提高分拣准确度, 提高了检测效率。王雷等^[10]计算 2 个部门吸阻检测数据的平均值, 通过比较差值是否超出规定值, 来判定仪器的一致性, 不能精确了解到仪器的符合性程度。朱青林^[11]研究出一种通过抽出烟支滤嘴芯, 检测卷烟烟丝段吸阻用以分析卷烟吸阻分布的方法, 为更好地降焦减害、产品开发、工艺改进等研究工作提供了数据支持。刘欢等^[12]选取 3R4F 标准卷烟作为试验样品, 应用建立的动态吸阻计算方法考察了烟支燃烧过程中动态吸阻随燃烧线位置的变化规律。但上述研究均是基于已有装置, 缺乏对整个系统全面的分析。

国内外综合测试台中吸阻/压降测量单元均采用临界流量孔(CFO)作为恒流发生装置, 通过压力传感器检测卷烟吸阻。任静霞等^[13]对 CFO 的气体稳定流动特性、气流速度与通道几何形状的关系以及气流通过喷管的流速和流量进行了分析, 同时还对标准恒流孔的材料选择及流量测量进行了说明。程静^[14]采用计算流体动力学方法对 CFO 在非标准条件下出现的计量特性偏差进行数值模拟, 模拟结果能够较好地预见环境影响下所产生的结果。蒋志才等^[15]基于计算流体动力学对烟草专用恒流孔进行研究, 综合分析后发现标准

基金项目 安徽省重大科学仪器专项(1510115223)。
作者简介 邹诚志(1993—), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 研究方向: 检测技术与自动化。* 通讯作者, 助理研究员, 博士, 从事检测技术与自动化研究。
收稿日期 2018-02-28

恒流孔能在其前端保持恒定的体积流量。通过 CFO 的气流量准确性检测将直接影响仪器性能的稳定和测量数值的准确度,其环境的温湿度对 CFO 的流量特性有影响。因此,研究 CFO 前端的压降检测分析,有利于提高卷烟吸阻检测系统的准确性。为了实现卷烟吸阻的准确测量,降低外界环境的影响,笔者根据卷烟吸阻测量标准的流量要求 (17.5 ± 3.0) mL/s,基于 CFO 器件设计了一种集多传感器测量的卷烟吸阻精密检测装置,能够实现卷烟吸阻测量的全面分析。



注:1.进料漏斗;2.步进电机;3.气动滑塞和底座;4.压力表;5.真空表;6.气体过滤;7.测量头;8.电路隔离板;9.电磁阀;10.电路板
Note:1.Feed hopper;2.Stepper motor;3.Pneumatic sliding plug and base;4.Pressure gauge;5.Vacuum gauge;6.Gas filter;7.Measuring head;8.Circuit separator;9.Solenoid valve;10.Circuit board

图1 吸阻自动测量装置
Fig.1 Automatic measuring device of cigarette draw resistance

装置工作时,计算机给 STM32 核心控制板发送指令,让其输出信号控制直流电机转动带动滚筒,完成卷烟的单只分离。由于重力的作用,卷烟落到测量头上方管道。吸阻测量时,STM32 通过控制电磁阀的通断控制气路来控制测量头的进样、测量、出样。进样时,STM32 控制真空发生器产生负压打开测量头内部乳胶管,烟支落下。然后切断负压,乳胶管收缩包住烟支,连通测量管路,压力传感器监测管路压降的变化情况。待压降值稳定时,读取温湿度传感器值,计算出吸阻值。测量完毕后,气路切换,再次打开乳胶管使滤棒落入出料口中。

2 测量原理

根据标准要求,吸阻仪及吸阻标准棒检定设备均以产生 (17.5 ± 0.3) mL/s 气流的 CFO 作为其恒流发生装置。CFO 器件的设计采用渐缩喷嘴结构,其内部形状如图 2 所示。喷嘴入口端气体状态参数记为 P_0, ρ_0, T_0 ,出口端气体状态参数记为 P_1, ρ_1, T_1 ,假设流动为等熵流动。

根据喷嘴流量计原理,当出口压力 $P_1 = 0.528P_0$ 时,流过喷嘴的最大质量流量为^[16]:

$$m_{\max} = A_1 P_0 \sqrt{\frac{1}{RT_0}} \sqrt{\frac{2K}{K-1} \left[\left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{2}{K-1}} - \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K+1}{K-1}} \right]}$$
 (1)

式中, A_1 是定值,由于 K 不变,在入口端温度 T_0 不变的情况下,最大质量流量 $m_{\max}$ 与入口端压力 P_0 成正比。

1 检测装置设计

卷烟吸阻自动测量装置由进样模块、测量模块、电路系统、气路系统等组成,其具体结构如图 1 所示。进料模块由进料漏斗和步进电机构成,进料漏斗包括步进电机连接的带凹槽滚筒,工作时电机的转动带动滚筒达到进样的功能。标准包覆模块由烟蒂端 9 mm 包覆块、气缸、气动滑塞、底座等组成。气路系统由 CFO 器件、气管和电磁阀组成。电路系统由电源、电路控制板、传感器等组成。

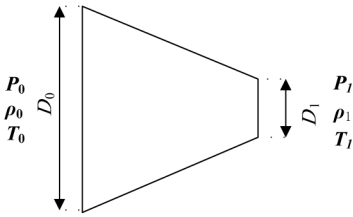


图2 CFO 内部形状
Fig.2 CFO interior shape

令 $H(K) = \sqrt{\frac{2K}{K-1} \left[\left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{2}{K-1}} - \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K+1}{K-1}} \right]}$, 则公式(1)可写成:

$$m_{\max} = \frac{A_1 P_0}{\sqrt{RT_0}} H(K)$$
 (2)

CFO 入口端接入不同吸阻值的样品(图 3),即在 CFO 入口端引入不可恢复的压损 P (由样品和仪器本身压降组成),滞止参数 P_0 发生变化,由 P_{atm} 降至 $P_{\text{atm}} - P$ 。

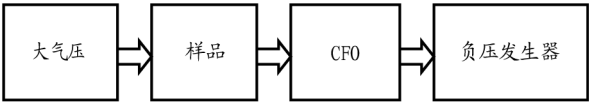


图3 CFO 理想气路
Fig.3 CFO ideal gas path

则其最大质量流量表示为:

$$m_{\max} = \frac{A_1 H(K) P_0}{\sqrt{RT_0}} = \frac{A_1 H(K)}{\sqrt{RT_0}} (P_{\text{atm}} - P) \quad (3)$$

式中, A_1 是定值, P_{atm} 为大气压力; $H(K) =$

$$\sqrt{\frac{2K}{K-1} \left[\left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{2}{K-1}} - \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K+1}{K-1}} \right]}.$$

对于流经 CFO 入口端的一定质量的气体满足气体状态方程:

$$P_0 V_0 = nRT_0 \quad (4)$$

则:

$$V_0 = \frac{nRT_0}{P_0} = \frac{mRT_0}{MP_0} = \frac{mRT_0}{M(P_{\text{atm}} - P)} \quad (5)$$

将(3)式代入(5)式有:

$$V_0 = \frac{m_{\max} RT_0}{M(P_{\text{atm}} - P)} = \frac{A_1 H(K)}{\sqrt{RT_0}} \times (P_{\text{atm}} - P) \times \frac{RT_0}{M(P_{\text{atm}} - P)} = \frac{A_1 H(K) \sqrt{RT_0}}{M} \quad (6)$$

在温湿度不变的情况下,由于 K 、 A_1 、 M 为定值, CFO 入口端的体积流量不受 CFO 入口端引入的压降 ΔP 影响,样品的出口端即 CFO 的入口端体积流量保持 17.5 mL/s 不变。但温湿度改变时, K 、 A_1 、 M 不为定值,则测量压降值将受到影响。

但在实际应用时,由于仪器管路中会串联电磁阀、过滤器等阻尼元件,气物流过该元件时会产生一定的压降,将从测头到标准恒流孔 CFO 之间的管路定义为抽吸管路,测试结构如图 4 所示。管路中 CFO 入口端流量 V_B 保持 17.5 mL/s 不变,而样品输出端流量 V_A 将受到抽吸管路压降的影响。

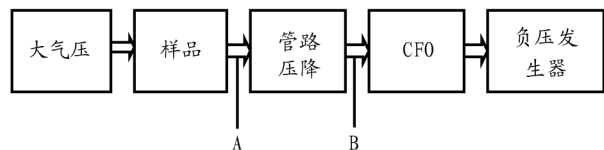


图 4 CFO 实际气路

Fig.4 CFO actual gas path

假设环境温湿度保持不变,大气压为 P_{atm} ,抽吸管路压降为 ΔP ,样品两端的压差为 P_1 。对于 A、B 端气体满足气体状态方程: $PV=nRT$ 。

在此考虑气体为定常流动,体积流量 Q 是同等时间内流过的体积 V 除以时间 t ,考虑两边同除以时间,有:

$$(P_{\text{atm}} - P)_1 \times V_A = (P_{\text{atm}} - P_1 - \Delta P) \times V_B \quad (7)$$

即:

$$V_A = \frac{P_{\text{atm}} - P_1 - \Delta P}{P_{\text{atm}} - P_1} \times V_B = \left(1 - \frac{\Delta P}{P_{\text{atm}} - P_1} \right) \times V_B \quad (8)$$

可知,在 P_{atm} 与 P_1 不变的情况下,抽吸管路压降越大,流经样品输出端的体积流量越小,从而影响测量的准确性。

但在实际卷烟吸阻测量过程中受测量管路压降和环境温湿度的影响,此时需采用温度传感器、湿度传感器、压差传

感器等多个传感器,对测量管路压降和温湿度实时监测。在不同的温湿度条件下测量标准棒数值,通过曲线拟合,计算出测量管路压降和温湿度影响的参数。通过参数修正测量值,以达到卷烟吸阻的精密检测。

3 检测电路设计

为实现卷烟吸阻的精确测量,使用 STM32F103 作为核心处理器,其电路系统框如图 5 所示。电路包括温度检测电路、湿度检测电路、差压传感器检测电路、复位电路、晶振电路、电源电路、按键电路、时钟电路、通信电路、电机控制电路、电磁阀控制电路、指示灯控制电路等。

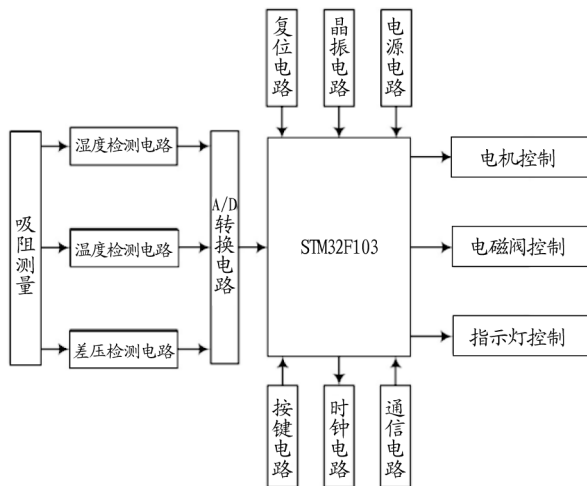


图 5 硬件电路设计框

Fig.5 Hardware circuit design block

STM32 通过通信电路 RS232 接口接收上位机的开始指令,然后输出用于控制步进电机的 PWM 信号和方向信号以及控制电磁阀的电压信号。通过控制步进电机驱动器实现步进电机运转,完成装置的进烟功能。通过控制电磁阀实现气路通断,完成卷烟吸阻的测量动作。信号经过 AD 转换器由模拟量变为数字量,经 STM32 处理后由 RS232 通讯口传递给上位机进行显示。

3.1 温湿度采集模块 温湿度传感器输出的两路信号分别是:温度信号的电压值是 0~5 V;湿度信号的电压值是 0~10 V。由于是不同量程的电压信号,所以给电路 AD 转换芯片的选择带来一定难度。ADS8509 是 16 位精度的 CMOS 结构的逐次逼近寄存器型 A/D 转换器,采样率高达 250 kHz,可以双极性输入且输入范围可以是 ± 10 、 ± 5 、 ± 3.3 V,通过外部简单的电阻匹配即可实现^[17]。采用外部时钟模式,通过时钟端 DATACLK、转换信号输出 BUSY、A/D 转换结果端 DATA 和片选端 R/C 4 个接口与 STM32 芯片相连,实现数据采集。因此,使用 ADS8509 芯片能够很好地满足该试验装置要求,其电路设计如图 6 所示。

P5 端子的 2、3 短接,电压采集为 0~10 V,P5 端子的 2、1 短接,电压采集为 0~5 V,同样的电路结构就能解决不同量程的电压输入。

3.2 差压传感器采集模块 卷烟吸阻的测量方式为当被测样品进入测量头,通过电磁阀控制传感器气路连通,数据采

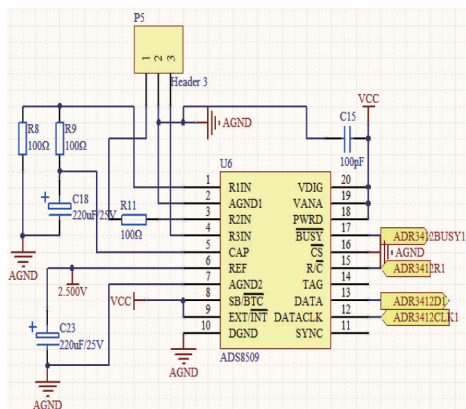


Fig.6 ADS8509 data acquisition circuit

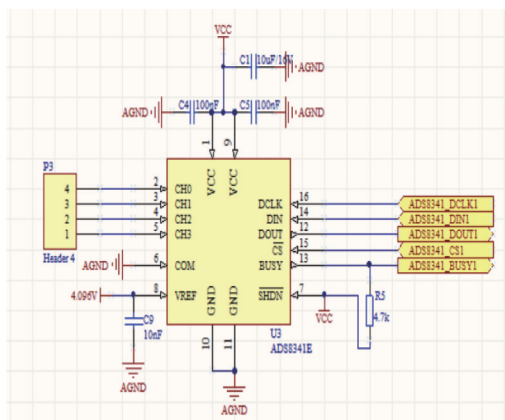
[illegible]

Fig.7 ADS8341 data acquisition circuit

4 软件设计

4.1 测量时序设计 压降测量的气路结构见图 8。电磁阀 1 号控制的气路为清洗气路,电磁阀 2 号控制测量头气路,电磁阀 3 号控制传感器气路。压降测量流程:电磁阀 2 开,滤棒进入测量管;电磁阀 2 关,电磁阀 3 开,乳胶管包覆烟蒂端 9 mm 进行滤棒压降测试;电磁阀 3 关,电磁阀 1、2 开,滤棒出测量头。测量时通过控制电磁阀的通断完成气路的通断。

```

graph LR
    P[压力源] --> PY[压力表]
    PY --> JY[减压阀]
    JY --> ZK[真空发生器]
    ZK --> CF0[CF0]
    ZK --> DYV[电磁阀2号]
    CF0 --> DYV1[电磁阀1号]
    DYV1 --> DYV3[电磁阀3号]
    DYV3 --> CL[测量头]
    DYV2[电磁阀2号] --> CL
  
```

Fig.8 Pressure drop measurement gas circuit structure

Figure 1 consists of two flowcharts, (a) and (b), illustrating data collection processes.

(a) ADS8509 温湿度采集 (Temperature and Humidity Data Collection):

- Start (开始)
- 启动信号设置 R/C 管脚 (Set start signal R/C pin)
- 等待 BUSY 管脚 输出一个 低电平 (Wait for BUSY pin to output a low level)
- 读取数据 (Read data)
- Decision: 下一组 数据 (Next group of data)?
 - If Yes (Y), return to the start of the data reading loop (before '等待 BUSY 管脚').
 - If No (N), return to the main program (返回主程序).
- 返回主程序 (Return to main program)

(b) ADS8341 压降数据采集 (Pressure Drop Data Collection):

- Start (开始)
- 设置寄存器初始化 (Set register initialization)
- 监视 DRDY (Monitor DRDY)
- Decision: 低电平? (Low level?)
 - If Yes (Y), write to the setting register and set the next step operation. Read the data register (写设置寄存器, 并设置下步操作. 读数据寄存器).
 - If No (N), return to the start of the DRDY monitoring loop (before '监视 DRDY').
- 读数据寄存器 (Read data register)
- Return to the start of the DRDY monitoring loop (before '监视 DRDY').

Fig.9 Acquisition program flow chart

试验在空调房进行,当实验室温度升至 27.5 ℃ 时,关闭空调让其自然降温。过程中每隔 1 min 记录测量 1 次标准棒吸阻,并记录此时的温度和湿度。吸阻随温湿度变化曲线见图 10。

在标准测量环境要求条件下,以不同阻值的标准棒进行吸阻测试,每根重复测量 5 次,结果见表 1。

测量结果表明,经过测量修正后,测量的误差不超过 5 Pa,满足测量的精度要求。目前市面上常用的吸阻仪的测量精度约为 10 Pa,该装置测试的结果比现有测量标准要求提高了 1 倍。

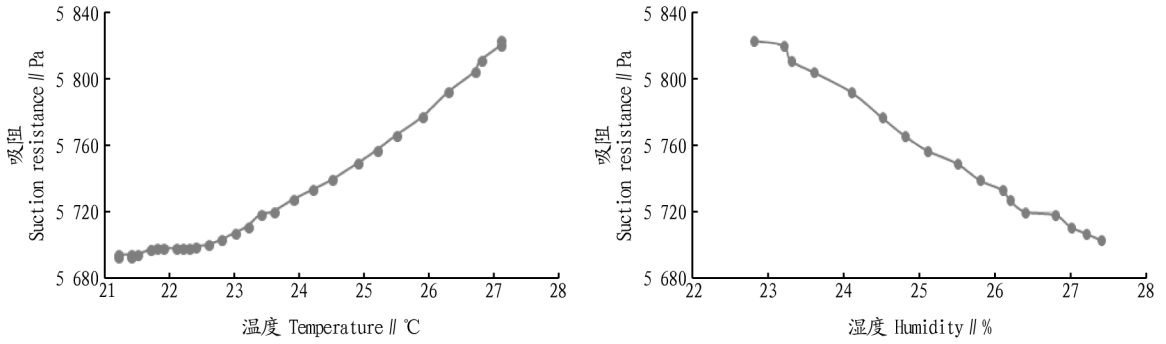


图 10 吸阻与温湿度变化曲线

Fig.10 Suction resistance changing with temperature and humidity

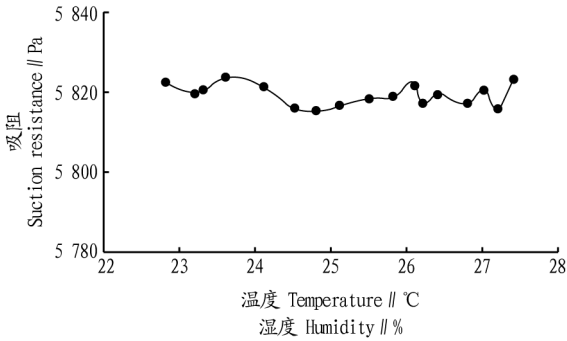


图 11 校正后的吸阻值

Fig.11 Corrected resistance

表 1 标准棒吸阻测量值

Table 1 Standard rod draw resistance measurement results Pa

标定值 Calibration value	1 次 The 1st time	2 次 The 2nd time	3 次 The 3rd time	4 次 The 4th time	5 次 The 5th time
5 998	5 996	5 997	6 000	6 000	5 999
4 705	4 702	4 701	4 707	4 704	4 705
3 643	3 643	3 640	3 641	3 645	3 644
2 641	2 643	2 640	2 642	2 642	2 641
1 699	1 700	1 701	1 698	1 699	1 698
856	856	858	856	855	856

6 结论

基于 CFO 器件设计了一种集多传感器测量的卷烟吸阻精密检测装置。该装置由进样模块、测量模块、电路系统、气路系统等组成。根据标准要求,吸阻仪及吸阻标准棒检定设备均以产生 (17.5 ± 0.3) mL/s 气流的 CFO 作为其恒流发生装置。基于 STM32 的核心控制板,采用温度传感器、湿度传感器、压差传感器等多个传感器,对测量管路压降精密检测和环境温湿度实时监测。在不同的温度湿度条件下测量标准棒数值,通过曲线拟合,计算出测量管路压降和温湿度影响的参数。通过参数修正测量值,以达到卷烟吸阻的真实

值。试验通过关闭 27.5℃ 的空调房温度使其自然冷却,监测出通过修正后的标准棒测量值波动较小。而且在标准测量环境要求条件下,以不同阻值的标准棒进行吸阻重复测量,测量精度达 5 Pa,比现有测量标准要求提高了 1 倍。

参考文献

- [1] 吴刚.封闭式烟草育苗室环境控制方法研究[D].重庆:重庆大学,2013.
- [2] 吴志英,李力,李东亮,等.卷烟单支重量、吸阻、通风率与感官质量的关系分析[J].中国烟草科学,2010,31(2):49-53.
- [3] COLARD S,JULIEN S.Characterisation of the draw resistance across a lit cigarette[J].Beiträge zur tabakforschung,2014,25(6):586-594.
- [4] 全国烟草标准化技术委员会.卷烟和滤棒物理性能的测定 第 5 部分:卷烟吸阻和滤棒压降:GB/T 22838.5—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [5] Tobacco and tobacco products.Draw resistance of cigarettes and pressure drop of filter rods.Standard conditions and measurement[S].Iso International Standard,2011.
- [6] British Standards Institution.Bs Iso 6565-Tobacco and tobacco products-draw resistance of cigarettes and pressure drop of filter rods-standard conditions and measurement[S].British Standards Institution,2015.
- [7] 代秀迎,吴超,赵战辉,等.综合测试台中吸阻/压降测量单元的优化改进[J].烟草科技,2014,58(8):18-21.
- [8] 陈丞.综合测试台检测细支卷烟的技术改造[J].安徽农业科学,2016,44(6):309-312.
- [9] 张吉卫,王旭光,张建军.基于 DSP 的卷烟吸阻测量仪自动分拣装置开发[J].仪表技术与传感器,2009,46(4):21-23.
- [10] 王雷,杨耀伟,纪朋.假设检验在卷烟嘴棒吸阻检测仪器比对中的应用[J].河南科技,2011,36(3):81.
- [11] 朱青林.使用 QTM 综合测试台检测卷烟吸阻分布的方法研究[J].安徽农学通报,2007,13(1):56,168.
- [12] 刘欢,王乐,胡少东,等.卷烟燃烧动态吸阻研究[J].食品与机械,2017,33(5):83-86.
- [13] 任静霞,曾波,孟庆华,等.标准恒流孔的研究[J].烟草科技,2004,48(10):15-17.
- [14] 程静.几种烟草专用标准器件内部流动的数值模拟[D].杭州:中国计量学院,2015.
- [15] 蒋志才,苏中地,韩彬,等.烟草专用标准恒流孔的研究[J].计量学报,2013,34(2):117-121.
- [16] 许铃,汪斌.音速喷嘴气体流量标准装置测量不确定度评定[J].中国测试,2007,33(3):63-64.
- [17] 王丹琦,黄根春,孙小刚.16 位串行模数转换器 ADS8509 及其应用[J].电子设计工程,2011,19(14):190-192.
- [18] 刘明伟.16 位模/数转换器 ADS8341 的应用[J].宝成科技,2003,15(1):4-10.

本刊提示 来稿请用国家统一的法定计量单位的名称和符号,不要使用国家已废除了的单位。如面积用 hm^2 (公顷)、 m^2 (平方米),不用亩、 尺^2 等;质量用 t (吨)、kg (千克)、mg (毫克),不用再担等;表示浓度的 ppm 一律改用 mg/kg 、 mg/L 或 $\mu\text{L/L}$ 。