

# 基于 NFC 的飞机起落架胎压在线检测装置设计

邓志云, 路红伟, 赵云峰, 陈各立

(中航飞机起落架有限责任公司, 长沙 410200)

**摘要:** 针对飞机航行所处自然、电磁等环境的复杂性, 以及部件安装空间极为有限的实际应用需求, 以近场通信 NFC 技术为基础, 结合胎压传感器检测技术, 设计实现了一种 NFC 被动模式的飞机起落架在线胎压检测装置, 并对射频天线及感应电源等电路进行优化设计, 采用传感器温度补偿校准方法, 较好地解决了胎压检测的温度影响问题; 试验验证表明, 该装置具备较好的按需工作特性, 满足飞机起落架胎压的在线、高效、准确的检测需求。

**关键词:** 胎压检测; 起落架; 近场通信 NFC; 射频天线; 传感器

## Design of Tire Pressure Online Detection Device for Aircraft Landing Gear Based on NFC

Deng Zhiyun, Lu Hongwei, Zhao Yunfeng, Chen Geli

(AVIC Landing Gear Advanced Manufacturing Corp., Changsha 410200, China)

**Abstract:** Aiming at the complexity of the natural and electromagnetic environment in which the aircraft is navigating and the limited space for installing the components, an on-line tire pressure detection device for aircraft landing gear in the passive mode of NFC is designed and implemented based on near-field communication NFC technology and tire pressure sensor detection technology. The circuit such as induction power supply is optimized and the temperature compensation calibration method of sensor is adopted to solve the problem of temperature influence in tire pressure detection. The test results show that the device has good on-demand performance and meets the on-line, high efficiency and accurate detection requirements of aircraft landing gear tire pressure.

**Keywords:** tire pressure detection; landing gear; near field communication (NFC); RF antenna; sensor

## 0 引言

起落架系统是航空武器装备的关键环节, 统计数据显示, 飞机事故中的大约 2/3 都与起落架有直接和间接的关系。飞机起飞着陆时间仅约占飞行时间的 6%, 但该过程事故/故障达到飞行事故/故障总量的 68.3% 以上。而轮胎是起落架系统的地面承载部件, 承受着飞机起飞、着陆及停机的各种工况载荷, 甚至是在最严重过载条件下, 也要能提供正常的承载功能, 胎压作为影响轮胎承载能力的一个重要指标, 直接掣肘着起落架系统功能的可靠性。

通常, 起落架胎压检测是在飞机的地面维护操作时进行的, 要求机轮处于冷却状态, 采用的主要方法包括人工目视检查、胎压测量表测量、电子仪表检查等, 其不足之处在于无法在飞行过程中实时监测轮胎压力、测量的准确性受温度因素影响、测量压力时因为测量表的连接而导致轻微泄露问题等。基于蓝牙、射频 RFID 等技术的无线胎压在线检测系统/装置在诸如汽车等地面交通工具中应用较多<sup>[1-3]</sup>, 但信号发送与接收端都需要提供额外的电源(电池或电源连接)才能有效工作, 也难以满足飞机安全性及电

磁兼容性要求, 且安装与布线受限。显然, 对于复杂天空环境下航行的飞机而言, 因其安装空间狭小, 要实现安全的按需、实时在线、连续、准确的胎压检测, 这也是上述胎压检测方法所不具备的。

近场通信 NFC 是基于 RFID 技术发展起来的一种短距离的高频无线通信技术<sup>[4]</sup>, 电子设备之间通过电磁感应耦合方式实现非接触式的点对点传输, 交换数据。相比 RFID 而言, 其传输距离小、带宽高、能耗低。特别是在被动模式下, 只需主设备提供射频场, 从设备就可以通过负载调制 (Load Modulation) 技术实现数据的回传, 无需再为从设备提供独立的电源。

本文针对飞机航行所处自然、电磁等环境的复杂性, 以及部件安装空间极为有限的实际应用需求, 以近场通信 NFC 技术为基础, 结合胎压传感器检测技术, 设计实现了一种 NFC 被动模式的飞机起落架在线胎压检测装置, 并对射频天线及感应电源等电路进行优化设计, 采用传感器温度补偿校准方法, 较好地解决了胎压检测的温度影响问题。试验验证表明, 该装置具备较好的按需工作特性, 满足飞机起落架胎压的在线、高效、准确的检测需求。

## 1 总体结构与原理

飞机起落架在线胎压检测装置由胎压检测主控制器、

收稿日期:2018-10-06; 修回日期:2018-11-06。

作者简介:邓志云(1975-),男,湖南邵阳人,硕士,高级工程师,主要从事飞机起落架收放与转弯控制方向的研究。

前端胎压采集器及显控系统三部分组成,其总体结构如图 1 所示。

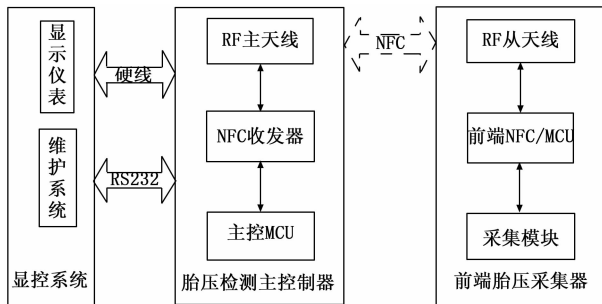


图 1 检测装置总体结构图

由于检测装置实际工作环境的复杂性,特别是对电磁兼容的要求,设计的检测装置采用了 NFC 被动模式的工作原理,从设备采用了无源设计实现胎压数据采集。检测装置各部分的主要功能设计如下:

1) 胎压检测主控制器:作为检测装置的核心部件,采用了微处理器 MCU 的硬件结构,通过内置的一组预设的胎压检测策略进行检测任务的调度执行,其核心功能包括:

(1) 作为 NFC 被动模式的主设备,负责为前端胎压采集器提供 RF 射频场;

(2) 按照预设的胎压检测策略,主控制器调度信号发射天线以 NFC 方式向前端胎压采集器发出在线检测指令;

(3) 接收前端胎压采集器回传的胎压数据及温度校准补偿数据,进行数据的预处理后再经过胎压补偿计算得出有效的胎压值;

(4) 通过硬线连接,将胎压值发送给显控系统的显示仪表进行显示;

(5) 通过 RS232 通信方式,接收显控系统发送来的待设置胎压检测策略数据,存储在装置内置的 NVM 非易失存储器中,同时设置为预设策略加以调度使用。

2) 前端胎压采集器:作为检测装置的直接数据采集部件,采用微处理器 MCU 的硬件结构,为以无源模式工作,集成了轮胎压力传感器。

(1) 作为 NFC 被动模式的从设备,通过感应主控制器提供的 RF 射频场实现设备上电工作;

(2) 接收并响应到主控制器发送的检测指令,驱动集成的压力传感器,完成胎压数据及温度补偿校准数据的采集,再通过发射天线以 NFC 方式回传给主控制器。

3) 显控系统:作为检测装置的显示及检测策略设置部件,由显示仪表和维护系统两部分组成。

(1) 显示仪表实现对接收的主控制器硬线发送的压力值,调理后进行显示;

(2) 维护系统提供 RS232 总线接口,对主控制器的胎压检测策略进行按需设置。检测策略包括:检测周期时间(以秒为单位)、检测指令序列(包括固件校准参数读取指令、胎压采集指令、温度采集指令、胎压读取指令、温度读取指令)、检测指令执行频次/周期。

## 2 硬件电路与结构设计

### 2.1 NFC 天线与 MCU 供电设计

NFC 天线是检测装置的关键部件,一方面为前端胎压采集器提供工作电源,同时也是主控制器和前端胎压采集器的数据通信的链路及载体。

NFC 天线通过磁场耦合进行通信的,天线结构决定其输入阻抗特性、方向性、效率、极化和增益等特性参数<sup>[5-6]</sup>。设计的胎压检测装置 NFC 天线及 MCU 芯片供电原理如图 2 所示。

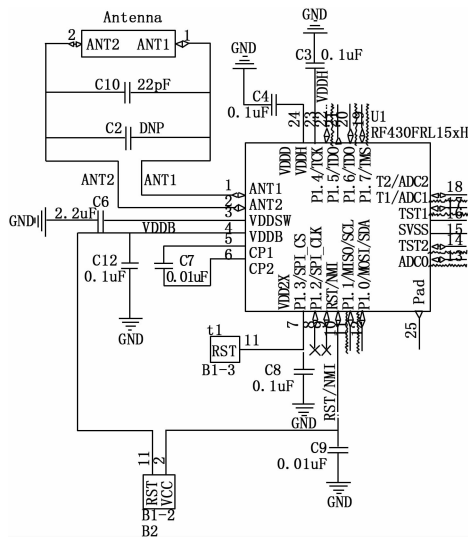


图 2 NFC 天线与 MCU 供电原理框图

1) NFC 天线设计为线圈型天线,特性参数如下:

(1) 谐振频率:工作频率 13.56 MHz,采用电容 C 与天线线圈并联组成 LC 谐振电路,工作频率计算方法为:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (1)$$

其中,线圈电感值 L 控制在几十 nH 到几  $\mu$ H。

(2) 传输距离:天线正对面的传输距离  $\geq 4$  cm 的设计指标。

(3) 回波损耗/输入特性  $L_r$ : -5 dB,其计算方法为:

$$L_r = -20 \log |\Gamma| \quad (2)$$

其中,  $\Gamma$  为反射系数,回波的损耗越小,匹配效果也就越好。

(4) 阻抗匹配:采用串并联电容和电阻的方式,对天线进行阻抗匹配,使得在 13.56 MHz 处回波损耗达到最小。电容值计算公式为:

$$C = \frac{1}{4Lf^2\pi^2} \quad (3)$$

当线圈电感值在几十 nH 到几  $\mu$ H 间取值时,电容值介于几十 pF 到几 nF 之间。

2) 微处理器 MCU 选用了 TI 的 RF430FRL15xH 进行控制器的硬件设计。RF430FRL15xH 是一款 13.56 MHz 传感器应答器<sup>[7]</sup>,包含可编程的 16 位 MSP430 低功耗微控制器,支持通过兼容 ISO/IEC15693 标准的 RFID 接口以及

I<sup>2</sup>C 接口来连接传感器,可在完全无源模式下运行。

### 3) 工作交互原理:

(1) 胎压检测主控制器由机上电源供电工作,控制器上电后,自动按照内置的胎压检测策略,调度发起检测任务,通过 NFC 天线提供 RF 射频场。

(2) 前端胎压采集器的 NFC 天线感应到胎压检测主控制器提供的 RF 射频场时,将 RF 射频场能量转换为 DC 电源后作为 MCU 的工作电源,MCU 上电转入处理器内设及传感器 I<sup>2</sup>C 接口的初始化,初始完成后自动开启压力及温度参数的采集,并将采集数据存储在内置共享存储器中,再以 NFC 方式回传给胎压检测主控制器,之后转入休眠模式,等待胎压检测主控制器的下一次调度。

## 2.2 传感器接口电路设计

前端胎压采集器集成压力传感器,传感器接口电路原理如图 3 所示。

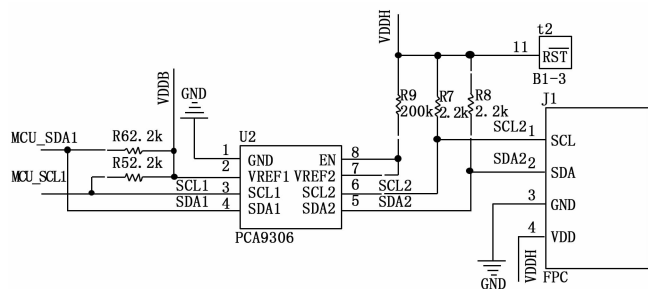


图3 传感器电路原理框图

图 3 中,MCU 与压力传感器之间采用基于 I<sup>2</sup>C 总线的通信接口进行数据交互,设计为 MCU—压力传感器的主从式工作模式,两者之间采用 PCA9306 芯片实现电平转换,利用四线扁平电缆进行电气信号连接。

压力传感器选用了 MESA 公司的 89BSD 030BarA—B 型隔离膜式数字输出压力传感器<sup>[8]</sup>是一种硅压阻式压力传感器,采用压阻应变的工作原理,同时提供了温度补偿和偏移校正。

工作时,压力传感器的设置参数为采样频率 256,采集压力精度为 0.008%Span,采集温度精度为 0.012℃。

压力与温度计算方法:

1) 温度  $T$ :

$$T = \frac{A_0}{5} + A_0 \times 2 \times \frac{D_2}{2^{24}} + A_2 \times 2 \times 2 \left( \frac{D_2}{2^{24}} \right)^2 \quad (4)$$

2) 温度补偿的压力计算  $P$ :

$$Y = \frac{D_1 + C_0 \times 2^{O_1} + C_3 \times 2^{O_1} \times \frac{O_2}{2^{24}} + C_4 \times 2^{O_1} \times \left( \frac{O_2}{2^{24}} \right)^2}{C_1 \times 2^{O_1} + C_5 \times 2^{O_1} \times \frac{D_2}{2^{24}} + C_6 \times 2^{O_1} \times \left( \frac{D_2}{2^{24}} \right)^2} \quad (5)$$

$$P_0 = Y \times \left( 1 - C_2 \times \frac{2^{O_1}}{2^{24}} \right) + C_2 \times \frac{2^{O_1}}{2^{24}} \times Y^2 \quad (6)$$

$$P = \frac{(P_0 - 0.1)}{0.8} \times (P_{\max} - P_{\min}) + P_{\min} \quad (7)$$

其中:

$A_{0.6}$ 、 $C_{0.6}$  为温度系数,在传感器出厂时进行标定并存储在传感器 PROM 中。

$Q_{0.6}$  为温度补偿因子,设定为 (9, 11, 9, 15, 15, 16, 16)。

$P_{\max}$ 、 $P_{\min}$  为压力传感器量程的最大值、最小值。

$Y$ 、 $P_0$  为压力补偿计算的中间变量。

## 2.3 气门嘴集成结构

气门嘴集成结构如图 4 所示,由气门芯、压力传感器、信息处理与控制处理器 MCU 三部分组成。

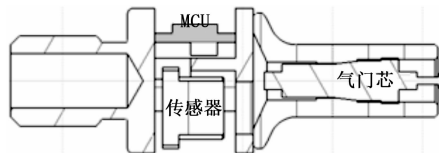


图4 气门嘴集成结构

气门嘴外壳采用不锈钢材质进行封装,充气时气体由气门芯进入,经过气门嘴内设的小孔进入到内部的压力腔后与轮胎实现空气联通,轮胎与传感器压力感应端直接有另一个空气孔连通。

其中,气门芯用于实现轮胎充气功能,压力传感器用于完成胎压的检测和温度数据采集,信息处理与控制处理器 MCU 则负责压力传感器的任务管理,连接了 NFC 天线并通过 NFC 天线实现外部 RF 射频场探测感应供电及射频通信。MCU 在接收主控制器检测指令后,负责调度压力传感器进行压力采集与信息处理,经 NFC 前端天线发回。

## 3 软件设计与实现

### 3.1 主控制软件

主控制软件为嵌入式软件,内置固化在胎压检测主控制器中,随系统上电后自动加载转入运行工作。胎压检测主控制器执行一次胎压检测任务的过程如图 5 (a) 所示,软件流程设计如下:

- 1) 系统上电初始化;
- 2) 以 MCU 时钟周期的定时方式 (如, 10 s/0.1 Hz 频率) 检查胎压检测策略的匹配条件,满足匹配条件时,产生 RF 场并转到 3),否则转到 8);
- 3) 检测策略设定任务已完成,转到 8),否则转到 4);
- 4) 以 NFC 方式发送新的检测指令;
- 5) 执行 NFC 胎压检测数据读取;
- 6) 对读取的胎压数据进行校准;
- 7) 将胎压数据发送给胎压信息监控系统,转回 3);
- 8) 判断是否收到策略设置数据,收到转到 9),否则转到 2);
- 9) 进行策略数据设置,转到 2)。

### 3.2 前端采集软件

前端采集软件为嵌入式软件,内置固化在前端采集器中,随前端采集器上电后自动加载转入运行工作。前端胎压采集器执行一次胎压数据采集的过程如图 5 (b) 所示,

软件流程设计如下：

- 1) 有 RF 场供电时转到 2)，否则不执行；
- 2) 系统上电初始化；
- 3) 判断是否为新的采集指令，是则转到 4)，否则转到 5)；
- 4) 进行数据采集处理，转回 3)；
- 5) 判断是否为新的反馈指令，是则转到 6)，否则转到 7)；
- 6) 通过 NFC 方式发送胎压数据，转回 5)；
- 7) 系统进入低功耗休眠模式。

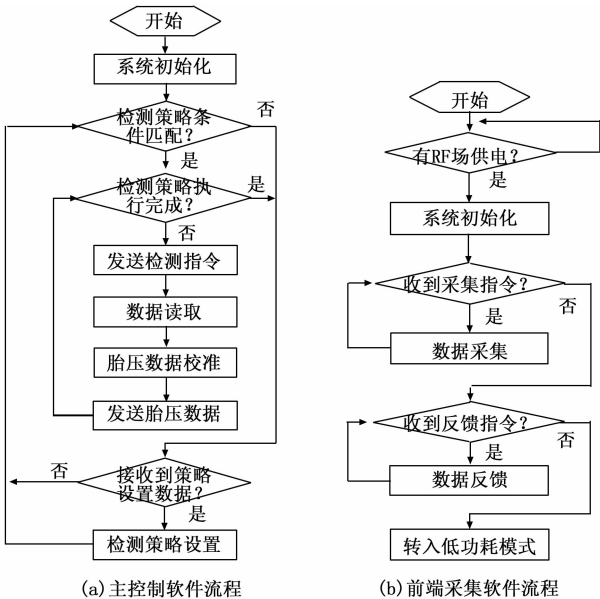


图 5 软件流程图

3.3 显控软件

显控系统的显示仪表负责胎压信息的显示，无内置软件。维护系统设计为 PC 端软件，功能相对比较简单，主要负责通过 RS232 总线对胎压监测主控制器的策略进行按需设置。本文在参考文献 [9] 中帧格式设计的基础上，设计了如图 6 所示的通信帧结构。

帧头	检测周期	指令序列	执行频次	帧尾
----	------	------	------	----

图 6 通信帧结构定义

- 1) 帧头：表示一帧数据的开始，用于同步控制，系统默认设定为 0xAA，长度为 1 字节；
- 2) 检测周期时间（以秒为单位）：表示全局检测指令序列的调度周期间隔时间，长度为 1 字节；
- 3) 检测指令序列：表示实际调度时需检测的数据项，包括读固件、采胎压、采温度、读胎压、读温度等 5 个子项，以低位到高位的方式组合为 1 个 5 bit 的字节型数据，长度为 1 字节。每个 bit 位分别设置，为 1 时设置检测子项生效，为 0 则取消该检测子项。如全部检测的序列值 0x1f；
- 4) 检测指令执行频次/周期：检测指令的全局调度频率，是 1 个 5 bits 的字节型数据，长度为 1 字节。每个 bit

位分别设置，为 1 时设置全局仅调度执行 1 次，为 0 则按照检测周期时间循环调度执行。如读固件指令调度 1 次，其余指令循环调度，设置的序列值 0x10。

5) 帧尾：表示一帧数据的结尾，系统默认设定为 0x55，长度为 1 字节。

在通信算法的实现时，参考了文献 [9] 中的帧元解析算法流程，不再详述。此外，在实际使用时，也可以采用通用的串口调试助手替代维护系统，只需按照给定的帧格式设置好通信数据进行数据发送，就可以达到对胎压检测主控制器调度策略的设置。

4 试验验证

试验验证以某型飞机的起落架地面试验台为基础平台，重点验证前端采集器感应距离即 NFC 天线特性参数。试验选取了 3 个前端采集器样件进行测试，天线直径 3.5 cm，安装电容为 22pF，感应距离测试数据见表 1，压力测试数据对比见表 2。

表 1 前端采集器感应距离测试数据

采集器	正对面积/%	感应距离 cm
# 1	100	5.0
# 2	100	4.5
# 3	100	5.0
# 1	30	1.2
# 2	30	1.0
# 3	30	1.2

表 2 前端采集器压力测试数据对比

前端采集器压力数值 V			手持压力	误差比 ( P-V /P×100%)		
1 #	2 #	3 #	表读数 P	1 #	2 #	3 #
10.513	10.461	10.451	10.500	0.124	0.371	0.467
9.031	8.949	8.985	9.000	0.344	0.567	0.167
7.724	7.652	7.685	7.700	0.312	0.623	0.195
6.307	6.258	6.274	6.300	0.111	0.667	0.413
4.618	4.594	4.587	4.600	0.391	0.130	0.283
3.507	3.505	3.481	3.500	0.200	0.143	0.543
2.513	2.504	2.518	2.500	0.520	0.160	0.720
1.001	1.007	1.005	1.000	0.100	0.700	0.500

表 1 中，当与主控制器天线 100% 正对面积时，感应的最大距离均达到了 4.5 cm 以上，当与主控制器天线 30% 正对面积时，感应的最大距离均达到了 1.0 cm 以上。表 2 中，从 3 个采集器的压力测试数据与实际的压力表比对结果看来，采集器压力值与手持压力表读数的差异在 0.8% 以内。

5 结论

本文设计实现的基于 NFC 被动模式的飞机起落架在线胎压检测装置，将近场通信 NFC 和胎压传感器检测技术相结合，通过传感器温度补偿校准方法解决了压力检测受温度影响的问题。试验结果表明，该装置满足飞机航行所处

自然、电磁等环境的复杂性,以及部件安装空间极为有限的实际应用需求。在实际样机的研制中,设计的前端采集器虽然非常紧凑,但其天线尺寸偏大,实际使用时也将受到安装空间的限制。在后续的产品优化过程中,可参考文献[10]来进一步实现NFC天线小型化以及安装的便捷性,在减小天线回波损耗的同时尽可能提高主从设备的通信距离。

#### 参考文献:

- [1] 随辰扬,潘宏博,冯明,等.基于智能手机的汽车胎压监测系统[J].传感器与微系统,2014(6).doi:10.3969/j.issn.1000-9787.2014.06.033.
- [2] 马建辉,马共立,刘媛.蓝牙技术在汽车电子产品中的应用[J].电子设计应用,2010,(2):42-43,48.
- [3] 庄严,王凌云,张国玉,等.通用型汽车胎压胎温监测系统研究[J].长春理工大学学报(自然科学版),2017,(6).
- [4] 王森,等.NFC技术原理与应用[M].北京:化学工业出版社,2014.

(上接第35页)

为了验证实际测量的准确性,使用原始的图像处理方法,直接计算所有像素点的灰度平均值进行验证。将图8(a)进行二值化处理得到图8(b),利用二值化图确定出区域范围并计算平均灰度,其中白色部分为背景无烟区域,计算出灰度平均值为156;黑色部分为黑烟区域,计算出灰度平均值为78,两者相减得到的灰度差 $\Delta G$ 为78,代入式(4)中计算得到黑度最大等级差为3.11,再根据表1的判定方法,判定该图中黑烟的林格曼黑度等级为3级,与软件检测的结果一致。由于在软件中采用了将图片进行网格分割并寻找最大灰度平均值的方法,一旦出现明显黑烟,总能在网格中找到灰度差最大的一个区域计算出黑度最大等级差,由此说明所提出的方法可以用于烟度的测量。

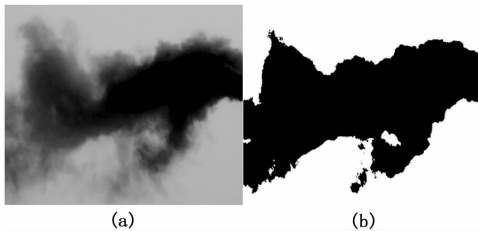


图8 实际测量示例与二值化

## 4 结束语

本文提出了基于机器视觉的在用柴油车烟度测量方法,主要包括烟度测量的系统组成与测量原理、硬件与软件的系统设计两部分,并通过实验验证了其可行性与有效性。硬件部分简要阐述了测量系统的配置,软件部分利用以OpenCV为基础的图像处理算法,借助标定过程的确定测量环境下图像灰度值与林格曼黑度等级的关系,通过实际测

- [5] 祝宇鸿,董尚文,李红阳,等.新型13.56MHz NFC天线的研究与设计[J].吉林大学学报(信息科学版),2017,(5):481-486.
- [6] 李力.NFC天线研究与设计[D].北京:北京邮电大学,2012:1-67.
- [7] Texas Instruments Incorporated. RF430FRL15xH NFC ISO 15693 Sensor Transponder [EB/OL]. <http://www.ti.com/lit/ds/slas834c/slas834c.pdf>
- [8] Measurement Specialties, Inc., a TE Connectivity company. 89BSD Calculation Method Application Note [EB/OL]. [https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDE-Controller?Action=srchrtv&DocNm=89BSD\\_Calculation\\_Method&DocType=SS&DocLang=EN](https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDE-Controller?Action=srchrtv&DocNm=89BSD_Calculation_Method&DocType=SS&DocLang=EN).
- [9] 邓志云,路红伟.基于RS485总线的起落架控制系统实时通信算法实现[J],计算机测量与控制,2018,26(7):75-78,83.
- [10] 胡文帅.近距离通信中的天线小型化技术研究[D].重庆:重庆邮电大学,2013.

量过程的区域分割、遍历算法找出与背景灰度相差最大的区域,判定以林格曼黑度等级表示的烟度值。在背景环境不变的情况下,利用该方法进行单次测量的过程与传统人工测量的方法相比更准确,与其他代替人工的方法相比用时短,操作便捷,不受天气影响,烟度测量的效率得到了大幅提高。

#### 参考文献:

- [1] DB11/045-2014,柴油车自由加速烟度排放限值及测量方法[S].2014.
- [2] 孙鹏.固定污染源排放烟气黑度的测定——林格曼烟气黑度图法(HJ/T 398-2007)有效性复审意见[J].环境与可持续发展,2017,2,123-124.
- [3] 陈玉琼.柴油车尾气光学烟度计[J].中国集成电路,2012,5(156):75-77.
- [4] 朱江.柴油机可见污染物的排放特点及测量方法[J].重庆理工大学学报(自然科学),2010,24(12):118-122.
- [5] 杨耀光.机动车排气污染物检测设备发展对节能减排的促进作用[J].汽车维修与保养,2014,11:75-79.
- [6] Rhys-Tyler G A, Legassick W, Bell M C. The significance of vehicle emissions standards for levels of exhaust pollution from light vehicles in an urban area [J]. Atmospheric Environment, 2011 (45): 3286-3293.
- [7] HJ 845-2017,在用柴油车排气污染测量方法[S].2017.
- [8] HJ/T 398-2007,固定污染源排放烟气黑度的测定林格曼烟气黑度图法[S].2007.
- [9] Achawangkul Y, Maruyama N, Chaichana C, et al. Biomass gasification utilization for double chambered crematory [J]. Energy Procedia, 2014, 52, 308-315.
- [10] 章毓晋.图像处理[M].3版.北京:清华大学出版社,2012.