

# 基于 LoRa 与机器视觉的 SF6 密度表读数采集系统<sup>①</sup>



黄为民<sup>1</sup>, 熊卫华<sup>1</sup>, 房体强<sup>1</sup>, 姜明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>浙江理工大学 机械与自动控制学院, 杭州 310018)

<sup>2</sup>(杭州电子科技大学 计算机学院, 杭州 310018)

通讯作者: 熊卫华, E-mail: xiongwh@zstu.edu.cn

**摘要:** SF6 气体密度表是一种布置在变电站, 用来测量断路器灭弧介质 SF6 气体密度状态的指针式仪表. 为了解决传统指针式 SF6 气体密度表在变电站自动化管理中难以应用的问题, 本文提出了一种基于 LoRa 无线通信技术与机器视觉的变电站 SF6 气体密度表远程抄表系统, 并给出了该系统的总体设计、硬件设计和软件设计. 该设计能够以高效率、低功耗、低成本的方式实现对变电站指针式 SF6 气体密度表的远程自动化管理. 该系统功能清晰、布置便捷、易于扩展、维护成本低, 对于变电站自动化管理方面的应用具有非常重要的参考价值.

**关键词:** SF6 气体密度表; 机器视觉; LoRa; 远程抄表; 自动化管理

引用格式: 黄为民, 熊卫华, 房体强, 姜明. 基于 LoRa 与机器视觉的 SF6 密度表读数采集系统. 计算机系统应用, 2020, 29(12): 106-110. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7685.html>

## SF6 Density Meter Reading Acquisition System Based on LoRa and Machine Vision

HUANG Wei-Min<sup>1</sup>, XIONG Wei-Hua<sup>1</sup>, FANG Ti-Qiang<sup>1</sup>, JIANG Ming<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

<sup>2</sup>(School of Computer Science and Technology, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The SF6 gas density meter is a pointer instrument arranged in the substation to measure the density state of the SF6 gas which is the arc extinguishing medium of circuit breaker. In order to solve the problem that the traditional pointer meter is difficult to apply in the substation automation management, this study proposes a remote meter reading system for substation SF6 gas density meter based on LoRa wireless communication technology and machine vision, and carries out the system's overall design, hardware design, and software design. This design can achieve remote automatic management of the substation pointer SF6 gas density meter in a high efficiency, low power consumption, and low cost way. This system has clear functions, convenient layout, easy expansion, and low maintenance cost. It has a very important reference value for the application of substation automation management.

**Key words:** SF6 gas density meter; machine vision; LoRa; remote meter reading; automated management

SF6 气体具有稳定的化学性质和优秀的绝缘、灭弧性能, 现经常被用作变电站高压断路器的灭弧介质<sup>[1]</sup>, 其运行压力、温度及密度状态关系到变电站的正

常运转与人员设备的安全. SF6 气体密度表是一种安置于变电站, 用来测量该气体密度状态的仪表. 随着近年来智能电网的建设逐步推广, 远程抄表已成为智能

① 基金项目: 国家自然科学基金 (61803339); 浙江省自然科学基金 (LQ18F030011); 浙江省重点研发计划 (2019C03096)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61803339); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LQ18F030011); Key Research and Development Program of Zhejiang Province (2019C03096)

收稿时间: 2020-04-18; 修改时间: 2020-05-15; 采用时间: 2020-05-18; csa 在线出版时间: 2020-11-30

变电站中不可或缺的组成部分<sup>[2]</sup>,传统的指针式 SF6 气体密度表已经不能满足变电站自动化管理的需要,因此大量的科研工作者投入到智能化数字式 SF6 密度表的研发当中<sup>[3]</sup>.但由于这种数字式密度表的研发进度缓慢且重布仪表的成本过高,目前 9 成以上的变电站依然在使用传统的指针式密度表,需要人工进行读数采集,效率低下,不利于变电站进行自动化管理<sup>[4,5]</sup>.

为了解决传统指针式 SF6 密度表在智能变电站中难以应用的问题,在人工智能与物联网大发展的背景下,本文提出了一种基于 LoRa 无线通信技术与机器视觉的变电站 SF6 气体密度表读数采集系统.

机器视觉可以代替人完成对仪表指针读数的测量,且有着高精度、高效率、不会疲劳等优势<sup>[6,7]</sup>.变电站空间跨度大、设施复杂、危险度高,采用传统的有线数据传输方案,布置难度高的同时还存在安全隐患. LoRa 无线扩频通信技术相较于 WiFi 和 NB-IoT 技术,有着功耗低、传输距离远、安全性高、组网灵活、后期运营成本低等优势<sup>[8,9]</sup>.本设计结合人工智能和物联网领域的热门技术,用机器视觉读取指针式 SF6 密度表的读数,用 LoRa 无线通信技术传输需要的数据,能够以高效率、低功耗、低成本的方式实现对变电站 SF6 密度表的远程自动化管理,大大地降低了布置难度,且后期维护和扩展更加灵活.

## 1 系统总体设计

SF6 气体密度表读数采集系统的设计分为 3 个部分组成,硬件电路的设计,LoRa 自组网协议的设计和表盘指针图像识别算法的设计.整个采集系统的架构见图 1.



图 1 系统架构图

硬件电路主要包括表计识别终端和集中器.表计识别终端是固定在变电站每个 SF6 气体密度表的表盘

前的,主要负责对表盘图像数据的采集、处理、运算和传输,同时协调 LoRa 终端节点的数据传输.集中器是 LoRa 网络的网关,位于服务器附近,与服务器通过串口相连接.集中器主要负责接收由各个表计识别终端设备发送过来的数据,同时协调整个 LoRa 自组网的数据通信,并且将汇总过来的数据通过串口发送给服务器.图像识别算法由表计识别终端的主控芯片执行,主要负责对图像传感器采集到的图像进行处理和计算得到正确的读数. LoRa 自组网协议是 LoRa 网络中各个节点与网关通信的基础,主要设计的是 MAC 层的媒体接入控制协议,确定各节点与集中器通信的信道复用方式.

## 2 硬件设计

SF6 气体密度表读数采集系统的硬件部分由表计识别终端和集中器两大部分组成.表计识别终端包含有电源模块、MCU 控制模块、LoRa 无线射频模块和摄像头模块;集中器包括供电电路、MCU 控制模块和 LoRa 无线射频模块. SF6 气体密度表读数采集系统的硬件框图如图 2 所示.

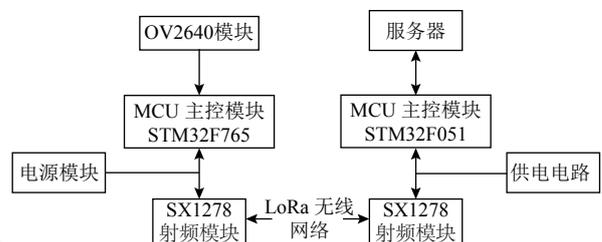


图 2 系统硬件框图

### 2.1 表计识别终端硬件设计

#### 2.1.1 MCU 控制模块

本终端系统的主控芯片采用意法半导体 ST(STMicroelectronics) 公司的一款 32 位的高性能单片机 STM32F765VGT6,该芯片核心采用 ARM Cortex-M7 架构,主频达到了 216 MHz,具有强大的逻辑与数字运算能力,片内集成了 512 K bytes 的 RAM 和 1024 K bytes 的 Flash 存储器.

表计识别终端的主控芯片主要任务有两个.一是负责对摄像头采集并发送过来的图像数据进行运算,得到 SF6 表计的读数,并将读数数据通过 SPI 总线发送给 LoRa 模块;二是负责执行 LoRa 网络终端节点的 MAC 层通信协议,按照规定的协议进行 LoRa 模块的

入网和数据的发送与接收。所以主控芯片不仅需要一定的控制能力,还需要足够的数字信号处理与浮点运算的性能,所以这里选用 STM32F765VGT6 这款高性能单片机完全可以满足设备功能需求。

### 2.1.2 LoRa 无线射频模块

本终端系统的通讯模块采用的是 Semtech 公司开发的扩频调制芯片 SX1278, 这款芯片采用 Semtech 公司专利技术——LoRa 无线扩频调制技术, 得以实现远距离、低功耗、可靠地传输数据。由于射频电路需要专业的技术人员进行设计和调试, 本系统采用的是 LoRa 射频模块。模块工作在 410~525 MHz 免费频段下, 通过 SPI 总线与 MCU 控制芯片进行通信。

### 2.1.3 摄像头模块

本终端系统的摄像头模块采用 OmniVision 豪威科技公司推出的 CMOS 图像传感器 OV2640, 该摄像头拍摄的图像分辨率用户可调, 最高可达 200 万像素, 可以做到清晰地采集表盘的图片。该摄像头体积小、工作电压低, 适合嵌入式系统的应用。同时支持多种格式的数据输出方式, 其中包括支持输出压缩图像格式的 JPEG 图像格式, 降低了数据传输量。另外该摄像头还支持各种基础的图像预处理设置, 可以为后续的图像算法开发提供便利。

### 2.1.4 电源模块

本终端系统的电源模块由锂电池、锂电池保护电路、锂电池升压电路和低压差线性稳压电路组成。由于本设备应用于变电站, 环境复杂且难以提供稳定的供电来源, 所以系统的能源由一节 4200 mAh 的大容量锂电池提供, 配合 XB8089 锂电池保护芯片使用, 防止过放导致的永久性损毁。由于单节锂电池的电压是 4.2 V, LoRa 模块和主控芯片的供电电压是 3.3 V, 不能直接为芯片和模块供电, 所以需要升压芯片 FP6267A 将电压升至 5 V, 再经过由低压差线性稳压芯片 AMS1117 组成的 LDO 电路将电压稳定到 3.3 V 才能进行供电。

## 2.2 集中器硬件设计

### 2.2.1 MCU 控制模块

集中器系统的主控芯片采用的是意法半导体 ST 公司的 32 位低功耗单片机 STM32F051K8U6, 该芯片核心采用 ARM Cortex-M0 架构, 主频最高可达 48 MHz, 片内集成了 8 KB 的 SRAM 和 64 KB 的 Flash 存储器。作为集中器的主控制芯片, 不需要进行复杂的运算, 只需要执行 LoRa 网络网关的 MAC 协议即可, 接收 LoRa

终端发送来的数据并下达一些协议指令。主控芯片通过串口与服务器连接, 将从终端收集的数据统一上传至服务器。

### 2.2.2 LoRa 无线射频模块

集中器系统的 LoRa 模块依然采用 SX1278 射频通信模块, 模块通过 SPI 总线与 MCU 控制芯片进行通信, 并执行 LoRa 网络网关的 MAC 层通信协议。

### 2.2.3 供电电路

集中器系统由于应用场所相对来说比较固定, 所以输入电压直接由外部 12 V 电源适配器输入, 经过 DC-DC 芯片 XL1509 降压至 5 V, 之后再经过由低压差线性稳压芯片 AMS1117 组成的 LDO 电路将电压稳定到 3.3 V, 为 MCU 和 LoRa 模块提供稳定的输入电压。

## 3 软件设计

### 3.1 LoRa 自组网通信协议的设计

网络协议是网络中各设备之间通信的基本准则, 通信协议设计的好坏直接决定了设备间通讯的可靠性和准确性<sup>[10]</sup>。本设计中的 LoRa 自组网采用的是星型拓扑结构, 因此不需要设计网络层的路由算法, 只需要设计 MAC 层的媒体接入控制协议即可。协议采用 Semtech 官方提供的基于 STM32 标准固件库的支持包进行开发。由于 SX1278 的物理通道数量有限, 因此信道共享方式采用 TDM 时分复用技术来加以解决, 集中器按照入网顺序给各终端结点分配设备 ID 序列号和时隙, 终端设备只有在各自的时隙时间内才能向集中器上传数据, 这保证了通信的可靠性。系统的时钟同步由集中器定期下达指令, 从而避免由于误差积累导致的系统时钟混乱, 影响系统的正常通信。

#### 3.1.1 LoRa 终端结点软件设计

终端设备采用多点接入载波监听、随机入网的方式加入 LoRa 网络。LoRa 终端结点上电时, 通过设置芯片寄存器使其工作于 RX 模式, 监听信道上的信号, 并且每一个结点都会产生一个随机延时。当延时结束时, 若信道上无信号传输, 则 LoRa 模块切换至 TX 模式, 向集中器发送入网请求数据帧, 随后切换回 RX 模式, 接收集中器返回的入网成功数据帧; 若有信号在传输, 则再产生一个随机延时, 当延时结束后再监听有无信号传输, 以此循环往复, 直至所有结点全部收到入网成功数据帧, 代表入网完成。随后各结点对入网成功数据帧进行解析, 得到设备 ID 序列号和结点时隙, 各终端

结点便按照各自的 ID 序列号和时隙进行数据包的上  
传. 终端结点的工作流程如图 3 所示.

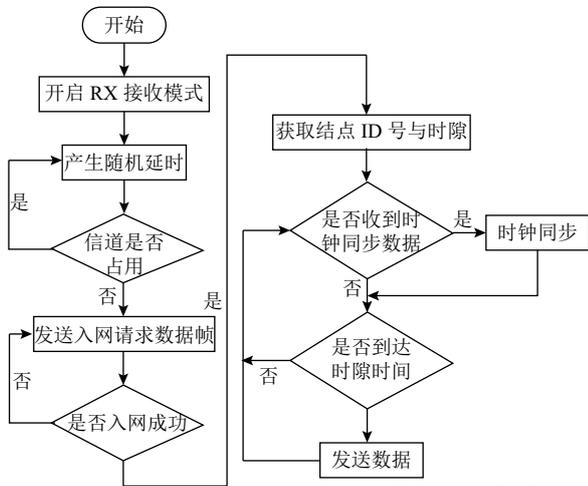


图 3 终端结点流程图

### 3.1.2 LoRa 集中器软件设计

LoRa 集中器上电时, 设置芯片寄存器使其工作在 RX 模式下, 时刻监听结点发送过来的入网请求数据帧, 若接收到入网请求, 则切换到 TX 发送模式, 发送入网成功数据帧, 按照收到数据帧的顺序给各结点发放 ID 序列号, 并设置各结点的时隙. 待所有结点入网成功后, 集中器便开始监听数据包, 若收到数据包, 便进行数据解析, 得到表盘指针的读数, 通过串口发送给服务器. 集中器的工作流程如图 4 所示.

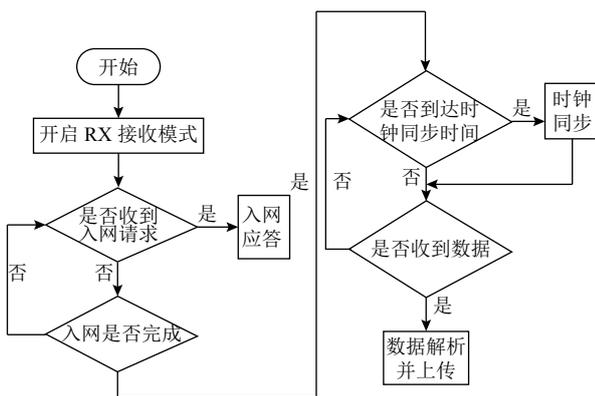


图 4 集中器流程图

### 3.2 密度表指针读数图像算法的设计

本设计的图像识别算法, 用于表计终端识别 SF6 表盘指针读数. 首先通过模板匹配算法精确定位到要识别的表盘区域, 排除掉无关信息, 为了提高准确率,

使用模板匹配法时采用了两次匹配的方法. 模板匹配是在一幅图像中寻找一个特定目标的方法, 基本思想是遍历图像中的每一个可能的位置, 比较各处与已知模板是否相似, 相似度最高的则认为是寻找的目标. 描述相似有多种方法, 本设计中描述“相似”采用了相关系数匹配法, 其计算公式如下:

$$R(x, y) = \sum_{x', y'} [T(x', y') \cdot I(x + x', y + y')] - \frac{1}{w \cdot h} \sum_{x', y'} T(x', y') \cdot \sum_{x', y'} I(x + x', y + y')$$

其中,  $T$  表示模板图像,  $I$  表示待匹配图像,  $w$ 、 $h$  为模板图像的宽和高,  $R$  为匹配程度. 模板匹配的结果如图 5 所示.



图 5 模板匹配效果

在识别到目标表盘区域后, 采用 K-means 聚类算法进行图像的二值化, 生成二值图像, 这样做一方面可以突出指针这项关键的要素, 另一方面可以减少图像的信息量, 降低芯片的运算成本, 从而可以降低芯片功耗保持设备较长时间的续航. K-means 算法流程如下, 首先从  $n$  个数据对象任意选择  $k$  个对象作为初始聚类中心; 根据每个聚类对象的均值 (中心对象), 计算每个对象与这些中心对象的距离; 并根据最小距离重新对相应对象进行划分; 重新计算每个有变化的聚类的均值 (中心对象); 重复前面两步直到每个聚类不再发生变化, 则二值化完成. K-means 二值化的结果如图 6 所示.

由于 SF6 仪表二值化以后中心镂空部分存在黑色小圆干扰指针读数, 通过预处理将中间小圆着色成白色, 仅依赖指针在表盘上的图像进行拟合. 拟合采用旋转直线法, 将图像中心定为圆心旋转直线, 将直线与背景黑色指针重叠像素个数作为拟合判别依据, 得到指针所在的直线, 结果如图 7 所示.



图6 K-means 二值化结果

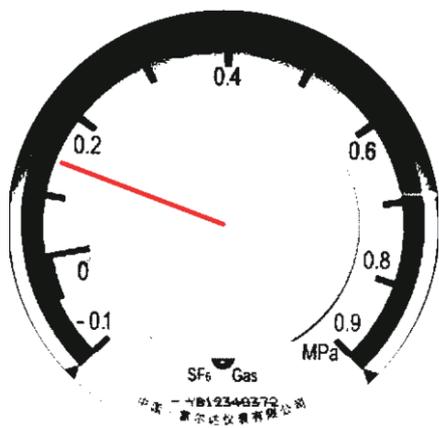


图7 直线拟合结果

我们可以设立一个参考系算出直线的函数表达式  $y=f(x,b)$ , 其中  $b$  为直线的斜率, 根据其斜率  $b$  可以得到指针所在直线与  $x$  轴正方向的夹角  $\theta=\arctan b$ , 同时根据表盘刻度值与角度  $\theta$  的关系, 我们可以通过计算推导出一个指针读数关于角度  $\theta$  的函数, 根据这个函数, 将得到的角度  $\theta$  带入便可以算出表盘指针的读数。

#### 4 效果展示与结论

系统设备安装完成, 所有程序调试正常后, 服务器端便可以收到数据, 效果如图8所示。

基于 LoRa 技术与机器视觉的 SF6 气体密度表读数采集系统实现了对变电站 SF6 气体密度表读数的识别与计算, 并且及时地通过无线通讯网络上传数据, 为

变电站高压绝缘气体 SF6 的自动化监测管理提供了一套全新的思路与解决方案。通过实际应用和测试, 本系统的测试结果达到了理想的期望值, 可以满足变电站气体安全监测实际应用的需要, 这对于变电站自动化管理这一方面具有非常重要的现实意义和参考价值。

设备ID	报警状态	抄表时间	水表读数
19063387	正常	2020-04-15 10:05:46	0.684
19063436	正常	2020-04-15 10:03:30	0.690
19063483	正常	2020-04-15 10:01:04	0.696
19063359	正常	2020-04-15 09:59:58	0.606
19063575	正常	2020-04-15 09:50:24	0.687

图8 服务器端效果图

#### 参考文献

- 徐燕燕, 晏波. 基于单片机的 SF6 气体密度实时监测系统的设计. 南方农机, 2018, 49(9): 175, 179.
- 肖思琪, 全惠敏, 钟晓先. 基于 LoRa 的远程抄表系统的设计与实现. 电子技术应用, 2018, 44(6): 31-34, 38.
- 黄亮, 杨杰. 基于 AVR 单片机的数字式 SF6 气体密度继电器. 武汉理工大学学报·信息与管理工程版, 2006, 26(8): 5-8.
- 颜晓东, 李雪妍, 刘传永, 等. 基于泛在电力物联网 NB-IOT 无线通讯技术 SF6 压力远传系统的研发与应用. 中国设备工程, 2019, (20): 155-156.
- 林献坤, 林羿江, 朱琳. 机械仪表的机器视觉数据自动获取技术. 组合机床与自动化加工技术, 2016, (7): 19-22, 26.
- 王怡, 赵菁, 文时祥. 指针式仪表数据智能采集系统设计. 电子科技, 2011, 24(3): 13-17.
- 施滢, 夏春华, 胡琳娜, 等. 指针式仪表读数的机器视觉智能识别方法. 传感器与微系统, 2017, 36(11): 47-49, 52.
- 蒲振, 吴迎年. 基于 LoRa 的用电信息采集系统研究. 电气技术, 2019, 20(6): 25-29.
- Cano-Ortega A, Sánchez-Sutil F. Monitoring of the efficiency and conditions of induction motor operations by smart meter prototype based on a LoRa wireless network. Electronics, 2019, 8(9): 1040. [doi: 10.3390/electronics8091040]
- 孙晓, 王兴, 杨守平, 等. 基于 LoRa 的智能水表抄表系统的设计与实现. 湖南工业大学学报, 2018, 32(2): 49-54.