

电力线路无线温度监测系统设计

李家瑞, 张庆, 刘卓燃, 于立新, 陈晗阳, 史旺旺

扬州大学电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州

收稿日期: 2022年3月3日; 录用日期: 2022年6月3日; 发布日期: 2022年6月10日

摘要

针对电力线路温度监测特殊需求, 设计了一种基于STM32L0系列单片机的低功耗电力线路无线温度监测系统。基于短距离蓝牙通讯, 实现了传感器终端和杆塔接收节点的通讯, 使用4G通讯实现安装在杆塔上的中继器和后台服务器的通讯。监控后台采用B/S模式, 结合Ajax技术, 实现了基于Web的实时通讯。采用休眠技术和休眠断电方法, 实现了小容量光伏电池和蓄电池的长期供电。系统投入实际现场应用, 具有良好的实时性、稳定性、低功耗性, 有很好的工程应用价值。

关键词

电力线路, 温度监测, 低功耗, 无线通信

Design of Wireless Temperature Monitoring System for Power Line

Jiarui Li, Qing Zhang, Zhuoran Liu, Lixin Yu, Hanyang Chen, Wangwang Shi

College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Received: Mar. 3rd, 2022; accepted: Jun. 3rd, 2022; published: Jun. 10th, 2022

Abstract

For the special requirements of power line temperature monitoring, a low-power power line wireless temperature monitoring system based on STM32L0 series is designed. Based on the short-distance Bluetooth communication, the communication between sensor terminal and the tower reception nodes are realized, and the communication between the repeater and the background server is realized based on 4G communication. The background monitoring software adopts B/S mode and is combined with ajax technology to realize Web-based real-time communication. Using sleeping technology and power-off control method, the long-term power supply of small-capacity photovoltaic cells and batteries is realized. The system is put into the actual field application, which has good real-time, stability, low power consumption, and a good engineering application value.

Keywords

Power Lines, Temperature Monitoring, Low Power Consumption, Wireless Communication

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电力系统中输送电能的主要载体是电力线路或电力电缆,它在电力系统中起着重要作用[1][2]。电力线路的运行状态与温度变化将对电力系统的安全可靠运行产生直接的影响。电力电缆长期处于过负荷状态是导致其发生故障的一个重要原因,电力线路接头接触不良导致触头过热也是线路故障的重要原因。上述因素均会引起电力线路的温度过高,因此电力线路的温度监测是预防上述故障的重要手段。

虽然温度测量技术是常规的测量技术,测量方法也有多种,如热敏电阻、半导体测温、红外测温、声表面波测量方法等[3][4][5][6]。但由于架空线路上存在高电压,距离地面位置较高,不允许测量终端与地面设备之间有直接的电气连接,因此测量数据一般通过无线通讯方式传送到接收设备。物联网技术中的无线通讯主要有 Zigbee 通讯、蓝牙、NB-IoT、Lora 等技术。由于温度测量终端与地面设备无连接,测量终端设备的供电也是一个不小的挑战,无线测温终端供电方式一般为电池供电、光伏电池 + 蓄电池供电、CT 取电。电力线路的地理位置一般较偏远,将数据传输至后台服务器的通讯方式一般也是无线通讯方式,这种远距离的无线通讯方式常用 4G/5G 通讯。

本文设计了一套电力线路温度在线监测系统,该系统利用低功耗蓝牙通讯、4G 通讯方式,可实现测温终端灵活安装;终端设备采用支持休眠的低功耗 CPU 和蓝牙芯片,同时考虑到温度监测时间间隔较长,对于不能实现休眠的调理电路,采用在休眠期间关断调理电路的方法,大大降低了测温终端功耗,实现休眠期间的供电电流为 μA 级,从而可以使用极小容量的光伏电池和蓄电池为测温终端长期供电。安装在杆塔上的中继器将接收的温度数据通过 4G 网络传送给上位机监控软件,监控软件采用 B/S 模式,使用 Ajax 技术在浏览器中能实时显示温度,实现各测温点温度数据记录、故障温度设定和故障报警功能。系统正常测温范围为 $-40^{\circ}\text{C}\sim 180^{\circ}\text{C}$,测量精度为 1.0°C ,能够满足电力线路温度测量要求。

2. 监控系统方案设计

本系统的结构框图如图 1 所示,由 ABC 三相温度终端、温度监测中继器、杆塔倾斜角测量、调试计算机、后台监控主机等构成。安装在杆塔上的温度监测中继器除接收终端温度外,还可测量杆塔的倾斜角。温度监测中继器不考虑休眠,由 12 V、20 Ah 的锂电池供电,同时配备 30 W 光伏组件,保证温度监测中继器的长期供电。温度监测终端采用低功耗 STM32L031 系列单片机,温度测量传感器采用 PT100;温度监测中继器采用 STM32F103VET6 单片机,配置有四路串行通讯接口,分别用于蓝牙模块、4G 模块、杆塔倾斜角测量、调试计算机的通讯。

温度采集终端与温度监测中继器之间的通讯为单向通讯,温度监测中继器通过 4G/5G 网络与监控后台实现双向通讯,后台的监控后台将数据进行整理,可以从电脑端和手机端直接登录 Web 服务器进行查看,在线监测电力线路运行的温度情况是否正常,若超过预先设定的阈值范围,会发出警告,提醒相关工作人员尽快查明原因。

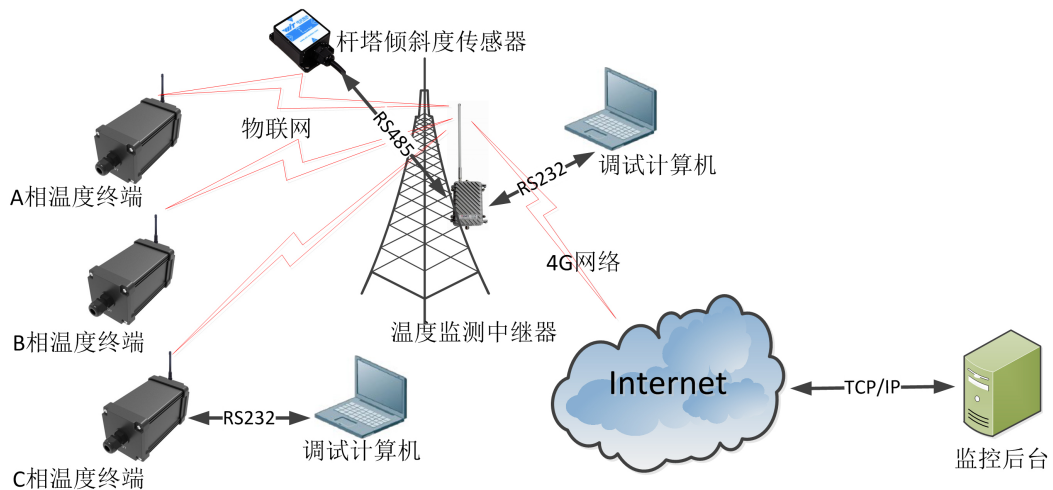


Figure 1. System structure block diagram
图 1. 系统结构框图

3. 无线温度监测终端设计

无线温度监测终端安装在电力线路上，要求体积小、重量轻、低功耗，是监控系统的基础单元，负责定期测量温度，并进行预处理后将数据传输到杆塔中继器。温度监测终端结构如图 2 所示。本监测终端采用光伏电池和锂电池供电，考虑到电池电压有一定的变化范围，电池电压过低时，可能使得 CPU 等芯片不能工作且影响 AD 转换的精度，为此采用升压芯片将电池电压升到稳定的 5 V 电压，5 V 电源给调理电路供电，同时经降压芯片得到 3.3 V 电压给 CPU 和蓝牙模块供电，这样可实现在蓄电池的正常电压变化范围内，电路能得到稳定的电压。调理电路由电桥和三运放仪用放大器组成，将电阻信号转换为电压信号，送到 CPU 的 AD 引脚。调理电路的电桥和运放功耗较大，为降低功耗在 CPU 休眠前通过 PMOS 开关管将调理电路电源关断。

CPU 采用 Cortex-M0+架构的 STM32L031 系列超低功耗单片机[7]，其在 RTC 运行时的待机模式的电流仅 0.6 μA 。无线通讯模块采用 2.4 GHz 的低功耗蓝牙模块，静态电流小于 1 μA ，具有专用的休眠/唤醒引脚，可由 CPU 控制其运行状态；模块之间的通讯采用握手机制，保证数据传输的可靠性，简化了程序设计；模块组网灵活，可实现三相温度监测终端与杆塔中继器之间的多对一通讯。

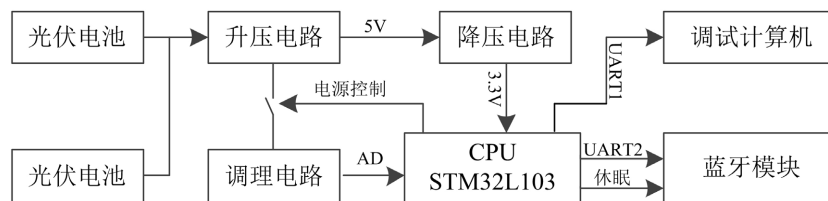


Figure 2. Structure diagram of wireless temperature measurement terminal
图 2. 无线温度监测终端结构图

3.1. 温度测量电路设计

温度测量电路的作用是将 PT100 热敏电阻的电阻值转换为电压，因此采用电桥电路。电桥电路输出信号为差动信号，同时要求所接电路的输入阻抗大，常规差动电路不能满足要求，本文选用三运放仪用放大器，温度测量原理图如图 3 所示。

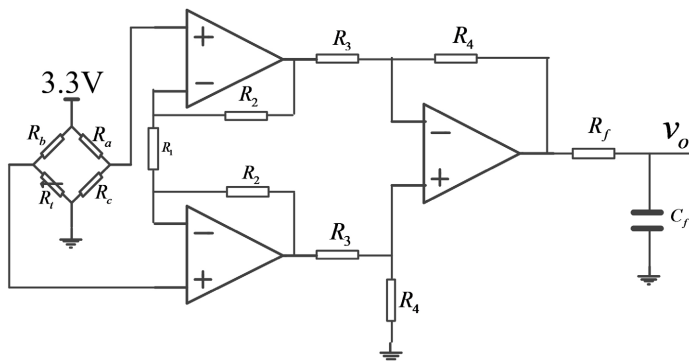


Figure 3. Schematic diagram for the temperature measurement
图 3. 温度测量原理图

在电桥电路中, R_a 、 R_b 、 R_c 为固定电阻, R_t 为 PT100 的电阻值。本文的温度测量范围为 -40°C ~ 180°C , 当温度从 -40°C ~ 180°C 变化时, R_t 在 84.27Ω ~ 168.48Ω 范围内变化, 因 CPU 的 AD 输入信号范围为 $0\sim 3.3\text{ V}$, 温度测量电路在 R_t 在 84.27Ω ~ 168.48Ω 范围内变化时, 输出电压为 $0\sim 3.3\text{ V}$ 。当取 $R_a = R_b$, $R_c = 84.27\Omega$ 时, 温度为 -40°C 时, 电桥的输出电压为 0 V 。 R_a 、 R_b 的阻值选择较小时, 电桥的输出电压大, 抗干扰性能好, 但电桥功耗大; R_a 、 R_b 的阻值选择较大时, 电桥的输出电压小, 抗干扰性能差, 但电桥功耗小。因此 R_a 、 R_b 的阻值的选取应折中选取, 本文选取 910Ω , $R_t = 168.48\Omega$ 时, 电桥的输出电压为 0.123 V , 仪用放大器的放大倍数为 26.81 。仪用放大器的放大倍数为 $k_b = \frac{R_2 R_4}{R_3 (1 + 0.5 R_1)}$, 可通过选择合适的 $R_1 \sim R_4$ 实现。

3.2. PT100 电阻温度曲线拟合

PT100 的电阻值与温度值的关系用表格形式给出, 根据分度表的值求温度的常用方法有查表法和公式法。查表法需要将分度表存储在 STM32 单片机中, 占用的空间大; 公式法需要事先拟合出多项式。为求解电阻与温度的关系式, 使用 matlab 的 polyfit 函数进行了多项式拟合, 考虑到温度与电阻的关系接近线性, 本文选用二阶多项式拟合, 见式(1)

$$t = a(R - 84.27)^2 + b(R - 84.27) + c \quad (1)$$

式中, a 、 b 、 c 分别为二次项系数、一次项系数和常数项, 拟合后的多项式系数为:

$a = 0.001031$, $b = 2.525$, $c = -39.983$ 。图 4 为采用二阶多项式拟合的温度误差曲线, 从图中可以看出, 在温度测量范围内, 拟合的温度误差最大为 0.025°C , 满足工程精度要求。

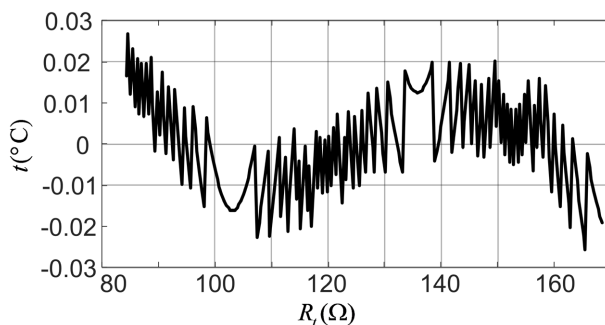


Figure 4. Temperature error curve by polynomial fitting
图 4. 多项式拟合温度误差曲线

3.3. 电池容量和光伏电池功率的计算

无线测控终端的采样时间间隔为 2 分钟，而实际的采样和发送时间本文选为 2 秒，采样时间的其余时间工作在休眠状态。休眠状态下的静态功耗主要由升压电路、降压电路、CPU 电路、蓝牙模块和其它辅助电路组成，调理电路的供电电路在这段时间内被切断，没有功耗。各电路的静态电路如表 1 所示。

Table 1. Quiescent current in a sleep state

表 1. 休眠状态的静态电流

电路	升压芯片	降压芯片	CPU	蓝牙模块	其他
静态电流	200 uA	0.1 uA	0.3 uA	1 uA	50 uA

由表 1 得到静态总电流为 251.4 uA。工作状态下的主要为蓝牙模块的发送电流，发送电流为 9.1 mA，发送时间为 2.6 毫秒，调理电路的工作电流约为 5 mA，将工作电流折算到 2 分钟时间内的平均总电流为 0.3337 mA。按供电时间 7 天计算，需要的总容量为 56 mA 时，本文选 90 mA 时的锂电池。设光伏电池的功率为 P ，按一天 5 小时光照时间计算，考虑到阴雨天，一天按 2.5 小时计算，光伏电池的功率 $P = \frac{3.7 * 0.3337 * 0.001}{2.5} = 0.0119W$ ，本文选用 4.5 V，90 mAh 的光伏电池，能满足供电要求，且有较大的裕量。

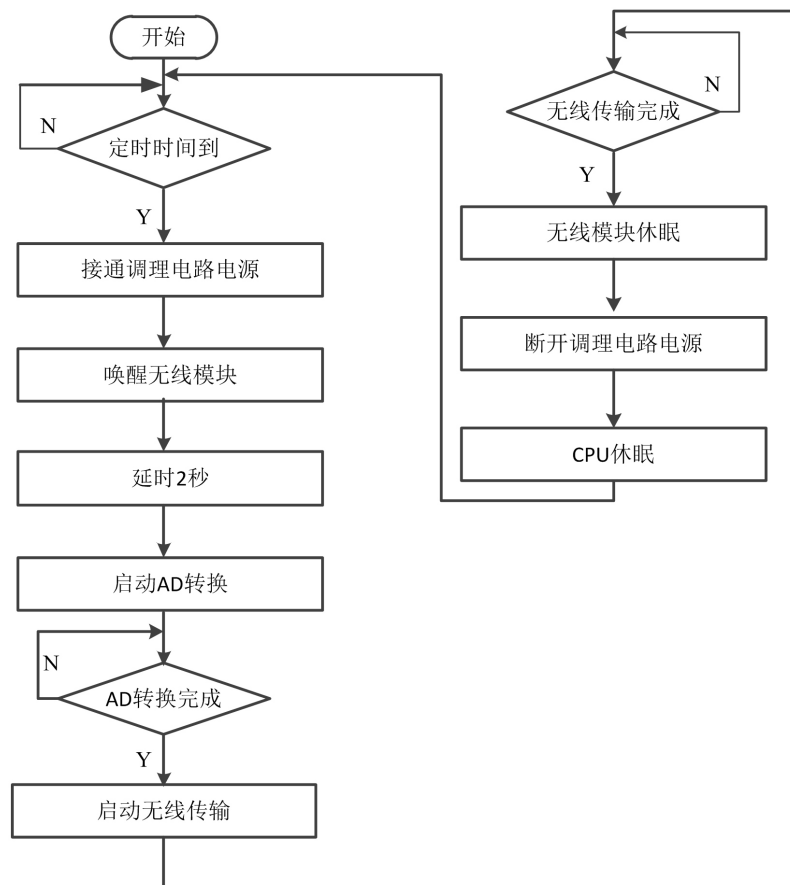


Figure 5. Flow chart of program in wireless temperature measurement terminal

图 5. 无线温度监测终端的控制流程

通过 CPU 和通讯模块的休眠控制以及调理电路的电源控制,可以在温度采样完成后的等待时间内,将电池供电电流降低到 μA 级,在温度监测这种采样频率不高的场合,节能效果非常明显。具体做法见程序流程图 5。

4. 杆塔中继器设计

杆塔中继器安装于距离无线温度监测终端的最近的杆塔上,由于杆塔上的位置限制少,对中继器的体积和功耗限制小,因此中继器采用 12 V、20 Ah 的锂电池和 30 W 的光伏组件供电方式,实现 24 小时不间断供电。12 V 电压经两级降压电路降压后,给传感器和 CPU 供电。中继器 CPU 选用 Cortex-M3 内核的 32 位 STM32F103VET6,该 CPU 接口丰富,本设备主要使用了该 CPU 的四个 UART 口,分别用于与调试计算机、蓝牙模块、4G 模块以及杆塔倾斜角的通讯,杆塔倾斜角传感器为 MEMS 传感器,为 RS485 接口,装置的结构框图见图 6。

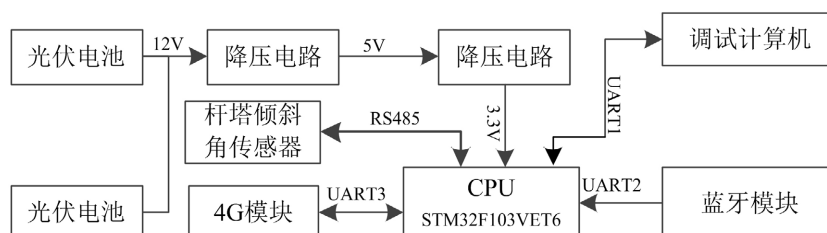


Figure 6. Hardware structure of the pole tower repeater
图 6. 杆塔中继器的硬件结构

杆塔中继器主要实现采集数据的转发,温度和倾斜角数据的转发目标有两个,一是调试状态下的调试计算机,二是运行状态下监控后台软件。考虑测温终端会经常处于休眠状态,本设备的蓝牙模块接收数据为被动接收,当蓝牙模块收到温度数据后,被立即转发至相应软件。杆塔倾斜角传感器使用 RS485 接口,通讯协议为 modbusRTU 协议,为请求响应模式。考虑到 4G 模块通讯会出现中断,为及时发现网络中断,中继器和监控之间设计了握手通讯,当握手超时后,中继器会复位 4G 模块,使得与后台软件的通讯能够继续。

5. 后台监控软件设计

后台监控软件电力线路无线温度监测系统的核心,它能实现对来自各中继器的温度、杆塔倾斜角的传感数据的实时显示、存储、查询与分析。后台监控软件采用 B/S 模式,使用 VisualStudio 2019 开发。后台监控软件的功能框图如图 7 所示。软件主要由 Web 服务器、TCP 服务器、SQLServer 数据库以及数据处理模块等组成。其中 Web 服务器是与客户端交互的接口,Web 服务器中设计了用户管理、用户登录、实时数据显示、历史数据查询、系统配置、报警查询等页面。为实现在 Web 服务器中网页中实时显示数据,在 Web 服务器中设计了一个 TCPServer 用于接收 4G 模块发送的传感数据,收到的数据一方面经过实时处理后,存入数据库,供历史查询;另一方面将实时数据存入 Web 服务器的全局数据区,供实时数据显示网页实时刷新网页,由于实时数据显示网页采用了 AJAX 技术,可实现界面无闪界面刷新。如果安装了新的测量终端,需要在系统配置网页进行型号、地址、描述等参数的设置,实现后台监控软件的唯一寻址。由于本系统安装的终端数量多,为方便查询,本系统对终端的描述采用层次结构,支持 6 级层次检索。历史数据查询、报警信息查询页面为用户提供了与 SQLServer 数据库交互的接口,方便用户查询和检索。

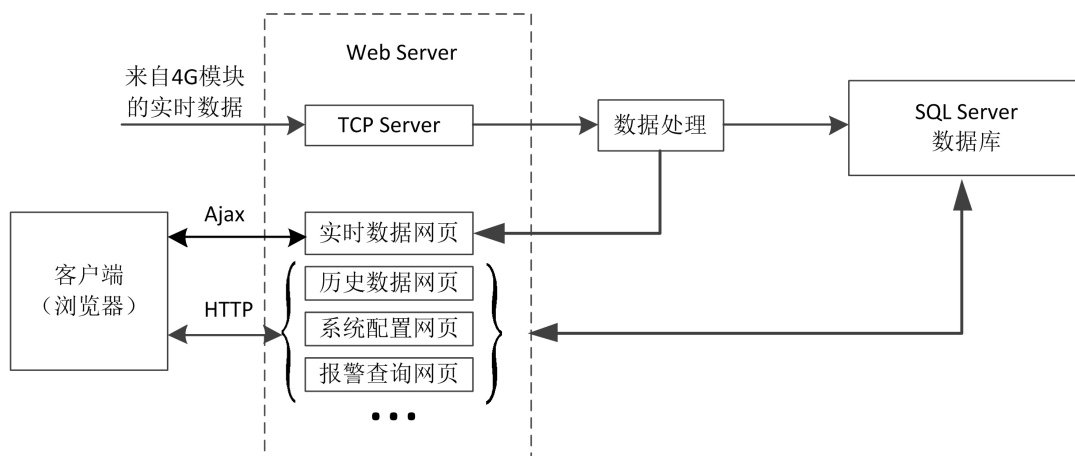


Figure 7. Backend monitoring software structure
图 7. 后台监控软件结构

图 8 为实时数据显示页面，页面由母版网页和两个子网页组成，左侧子网页采用树形控件，控件中内容为 6 级层次描述，这样用户按照层次描述可以快速找到所安装终端。找到后，右侧子网页可以显示对应终端的实时数据。



Figure 8. Real-time data monitoring interface
图 8. 实时数据监测界面

6. 结论

本文设计了一种基于蓝牙和 4G 通讯的电力线路无线温度监测系统，该系统主要由多个无线温度监测终端、杆塔中继器和后台监控软件组成。通过采用低功耗 CPU 和蓝牙通讯模块，结合休眠和电源控制等技术，实现了低功耗无线温度数据采集。杆塔中继器实现了温度数据的转发，同时测量了杆塔倾斜角。后台监控软件采用 B/S 模式，采用 Ajax 技术，在一个平台中实现实时数据和历史数据的通讯。本文设计的系统结构简单，工作稳定可靠，测温节点易于安装实现，为电力线路温度监测提供了可行的解决方案。

基金项目

江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目“电力线路温度监测系统”(202111117085Y)阶段性研究成果。

参考文献

- [1] 宋鹏先, 朱晓辉, 朱明正, 王浩鸣, 房晟辰. 电力电缆线路运行温度在线检测技术应用研究[J]. 工程技术研究, 2018(2): 33-34.
- [2] 张利. 温度在线检测技术在电力电缆线路的应用[J]. 集成电路应用, 2020, 37(3): 64-65.
<https://doi.org/10.19339/j.issn.1674-2583.2020.03.027>
- [3] 张旭, 亓学广, 李世光, 芮昱, 邱彪. 基于 STM32 电力数据采集系统的设计[J]. 电子测量技术, 2010, 33(11): 90-93.
- [4] 罗俊华, 周作春, 李华春, 罗旻. 电力电缆线路运行温度在线检测技术应用研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 169-172
- [5] 李德泉. 电力电缆运行状态在线监测系统的设计[J]. 通信电源技术, 2017, 34(1): 93-94.
- [6] 赵久涛, 袁华, 赵民. 电力电缆运行的温度在线检测技术应用[J]. 数字技术与应用, 2019, 37(9): 44+46.
- [7] 季力. 基于 STM32 芯片的电参数测量与数据传输[J]. 自动化与仪器仪表, 2010(3): 137-139.