

基于磁场取能的电缆无线测温装置设计

苏里阳¹, 李宇²

(1. 中国人民解放军 91550 部队, 辽宁 大连 116023;

2. 大连海事大学, 辽宁 大连 116000)

摘要: 电缆表面温度是电缆工作状态判断与故障点定位的重要依据; 针对人工检测与有线检测成本高、实施困难等问题, 设计了一款基于磁场取能技术的自供电无线测温装置; 该装置通过取能磁环将军事电缆正常工作时所产生的磁场能量收集并分配, 实现了测量装置的自供电; 同时, 采用低功耗单片机与温度传感器收集电缆表面温度数据, 并通过 LoRa 通信将温度信息传送至测温基站; 研究了磁场取能原理, 分析了电缆工作电流与取能磁环参数对取能装置输出功率的影响, 在此基础上设计了实验样机; 实验结果表明, 所设计的测温装置能在电缆正常运行条件下实现自供电, 且能完成稳定准确的温度数据上传。

关键词: 磁场; 取能; 测温; 自供电; LoRa 通信

Design of a Wireless Temperature Measurement Device for Cables Based on Magnetic Field Energy Harvesting

SU Liyang¹, Li Yu²

(1. Unit 91550, PLA, Dalian 116023, China;

2. Dalian Maritime University, Dalian 116000, China)

Abstract: The surface temperature of power cables is a crucial basis for their status detection and fault location. In response to the high complexity and cost of manual and wired detection methods, a self-powered temperature monitoring device based on a magnetic field energy harvesting technology is proposed. The proposed device collects and distributes the magnetic field energy generated by military cables during normal operation through an energy-harvesting ring. Additionally, a low-power microcontroller and sensor are used to measure the temperature of cables, and send the temperature information to the temperature base station via LoRa communication. The working principle of magnetic field energy harvesting is investigated and the relationship between the current of cables and the output power of the energy-harvesting device is also analyzed. Besides, an prototype is developed. Experimental results demonstrate that the proposed temperature monitoring device can be self-powered under normal conditions, with the temperature data sent accurately and stably.

Keywords: magnetic field; energy harvesting; temperature measurement; self-powered; LoRa communication

0 引言

军事试验活动对电力供应和信息传递依赖程度极高, 是直接决定活动成败的关键条件。受时间、场地和自然环境等多因素影响, 军事试验中电力和通信保障技术更为复杂、稳定性要求更高。为保障装备可靠工作, 开展电缆状态监测和故障预警十分必要。在电缆故障不同诱因中, 过负荷运行是影响电缆性能的重要原因, 电缆过载容易引起绝缘材料有损极化, 最终导致绝缘老化甚至击穿。电缆温度的实时检测与快速定位是确保电

力、通信系统稳定的重要途径。

不同于传统架空线路, 军事试验电缆敷设环境更为复杂, 可靠性、实时性要求更高, 人工监测难以有效支撑活动要求^[8-14]。为解决这一问题, 国内外学者提出了基于不同种类传感器的分布式电缆测温网络, 用以提供全面且实时的电缆温度监控。

文献 [15] 提出了一种基于热电偶的电力电缆远程温度检测装置, 通过 RS485 总线将采集到的温度数据实时上传。然而, 热电偶作为电信号敏感元件应用于电力电缆复杂电磁环境, 其测量精度易受影响。文献 [16]

收稿日期:2025-03-02; 修回日期:2025-04-22。

作者简介:苏里阳(1991-),男,硕士,工程师。

引用格式:苏里阳,李宇. 基于磁场取能的电缆无线测温装置设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(9): 91-99.

与 [17] 提出一种基于红外测温探头的非接触式远程电缆测温装置, 稳定性高且对电缆运行环境无直接影响。然而, 当电缆敷设空间较小时, 积聚的热量会影响后续故障定位精度。文献 [18] 提出了一种基于分布式光纤温度传感器的电缆网络测温系统, 具有测温精度高、数据上传及时等优点。但在实际应用中, 光纤测温系统成本较高, 且不易弯折, 不适合大范围应用。文献 [19-21] 采用集成式测温芯片监测电缆温度, 成本低精度高。然而, 其电源多为电池或开关电源, 占用空间大且不易维护, 复杂的敷设环境下运行成本过高。

针对以上问题, 本文设计并实现了一种基于磁场能量收集的电缆表面温度测量装置。其通过收集正常运行电缆周围的磁场能实现温度传感器及其附加电路的供电; 同时, 主控单片机对所采集的温度数据进行比对筛选, 仅在温度上升超过预设阈值时接通 LoRa (Long Range Radio) 通信模块并将温度异常数据上传至测温基站, 从而大幅降低系统能耗与故障定位时间。该装置能够实现自供能与远程数据收集, 无需现场人员操作, 降低了系统成本。

1 系统结构及原理

本文所设计的无线电缆测温装置由能量收集管理模块与温度采集发送模块两部分构成。其中, 能量收集管理模块用于收集并存储电缆运行过程中周围所产生的磁场能并为后续模块供电, 由图 1 所示, 由取能单元、能量管理单元、储能单元 3 部分构成。温度采集发送模块由测温单元、主控单元、信号发送单元 3 部分构成, 其将采集到的电缆温度信息筛选整理, 并将异常数据通过 LoRa 通信网络上传至测温基站完成实时温度监测。

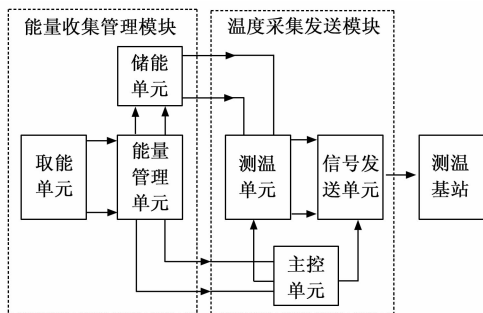


图 1 系统结构示意图

实际工作中, 温度采集发送模块直接由储能单元供电, 能量管理单元在取能单元供电不足以维持储能单元最小供电电压时通知主控单元。主控单元依据储能情况实时切换系统工作模式, 在供电不足时切入低功耗模式并延长采样周期, 同时停止数据发送。在供电正常时提升温度采集频率并激活信号发送单元上传温度数据。

2 系统硬件设计

2.1 能量收集管理模块设计

依据功能的不同, 能量收集管理模块由基于纳米晶磁环的取能单元、基于 ADP5901 的能量管理单元、以及基于超级电容的储能单元 3 部分组成。

2.1.1 取能单元设计

本文所设计的取能单元由取能线圈与整流装置组成。其中, 环形取能线圈安装于通电电缆上, 当电缆中通过交变电流时, 根据法拉第电磁感应定律, 在线圈磁环中将产生交变磁场, 进而在次级线圈中产生感应电动势。由安培环路定律可知, 对于内半径为 R_i , 外半径为 R_o , 高度为 h_r 的磁环, 当电缆中通过的工频电流为 I_ω 时, 磁环中的磁通量 Φ 与电缆电流间的关系为:

$$\Phi = \iint_S B \cdot dS = \int_{R_i}^{R_o} \frac{\mu_0 \mu_r I_\omega}{2\pi r} h_r dr = \frac{\mu_0 \mu_r I_\omega h_r}{2\pi} \ln \frac{R_o}{R_i} \quad (1)$$

式 (1) 中, B 为通电电缆周围空间磁感应强度, μ_0 与 μ_r 分别为真空磁导率及磁芯材料有效相对磁导率, S 为磁芯截面积。当单股线圈匝数为 N 时, 次级绕组产生的感应电动势 $e(t)$ 为:

$$e(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

将式 (2) 代入式 (1) 可得:

$$e(t) = -\frac{\mu_0 \mu_r N h_r}{2\pi} \ln \frac{R_o}{R_i} \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出, 在电缆电流及电缆外围空间有限的情况下, 选择相对磁导率 μ_r 较高的磁芯材料是提升次级线圈输出电动势, 增大取能装置功率等级的主要方法。表 1 给出了常用磁芯材料的磁性参数对比。

表 1 常用磁芯材料参数

参数	硅钢片	铁氧体	坡莫合金	纳米晶
饱和磁感应强度 B/T	1.7~2.0	0.4~0.5	0.6~1.0	1.0~2.0
最大磁导率 μ_r	2×10^4	5×10^3	2×10^5	2.2×10^5
电阻率/ $(\mu\Omega \cdot \text{cm})$	40~50	100~300	60~85	100~150

从表 1 可以看出, 坡莫合金与纳米晶具有较高的磁导率, 均适合作为取能线圈磁芯。然而, 相较于坡莫合金, 纳米晶虽因其更高的电阻率在应用中更易发热, 但其具有更高的饱和磁感应强度 B , 这使得在大电流情况下不易发生磁芯饱和, 在获取相同的能量时磁环尺寸与重量更小。综合考虑以上因素, 本文选取纳米晶材料磁环。

图 2 给出了取能线圈及其等效电路图, 其中, L_m 为简化后的线圈磁化电感, 其在非饱和状态下可以表示为:

$$L_m = \frac{N \mu_0 \mu_r h_r}{2\pi} \ln \frac{R_o}{R_i} \quad (4)$$

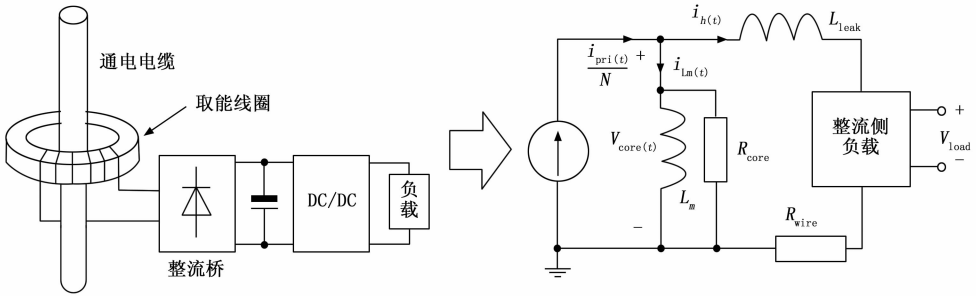


图 2 取能线圈等效电路图

L_{leak} 与 R_{wire} 分别表示线圈漏感与等效电阻, R_{core} 为磁芯等效电阻, $i_{Lm(t)}$ 与 $i_{h(t)}$ 分别为磁化电流与能量收集电流。 $i_{\text{pri}(t)}$ 表示电缆内工频电流, 其大小由下式表示:

$$i_{\text{pri}(t)} = I_{\text{prim}} \sin(\omega t) \tag{5}$$

式 (5) 中, I_{prim} 表示工频电流峰值, ω 为工频电流角频率。取能线圈输出侧交电流电压用 $V_{\text{core}(t)}$ 表示。其经整流桥整流后的电压值为 V_{load} , 则负载侧得到的功率可以表示为:

$$P_o = \frac{2}{T_{\text{pri}}} \int_{t_s}^{t_s+0.5T_{\text{pri}}} V_{\text{load}} \frac{i_{h(t)}}{N} dt \tag{6}$$

其中, T_{pri} 表示工频电流周期, t_s 表示每半个周期能量开始向负载传输的时刻, 由于线圈副边电流在 t_s 时刻与与磁化电流 $i_{Lm(t)}$ 相等, 则有:

$$i_{Lm(t_s)} = \frac{i_{\text{pri}(t_s)}}{N} = \frac{I_{\text{prim}}}{N} \sin(\omega t_s) \tag{7}$$

根据线圈伏秒平衡原理, 磁化电流 $i_{Lm(t)}$ 的在半个周期内的变化量 $\Delta i_{Lm(t)}$ 可以表示为:

$$\Delta i_{Lm(t)} = \frac{\int_{t_s}^{t_s+0.5T_{\text{pri}}} V_{\text{core}(t)} dt}{L_m} \cong \frac{V_{\text{core}(t)} \cdot 0.5T_{\text{pri}}}{L_m} \tag{8}$$

将式 (6) 与 (7) 代入式 (2.8) 可得:

$$t_s = -\frac{1}{\omega} \arcsin\left(\frac{V_{\text{core}(t)} \cdot T_{\text{pri}}}{4I_{\text{prim}}NL_m}\right) \tag{9}$$

将式 (9) 代入式 (6), 负载侧功率 P_o 表达式可以写为:

$$P_o = \frac{2\sqrt{2}V_{\text{core}(t)} i_{\text{pri}(rms)} \cos(\omega t_s)}{N\pi} \tag{10}$$

其中: $i_{\text{pri}(rms)}$ 为初级线圈电流有效值。由于取能线圈的匝数及磁化电感均为极大值, 故式 (9) 中 t_s 的值将收敛于 0。因此, 式 (10) 可进一步简化为:

$$P_o = \frac{2\sqrt{2}V_{\text{core}(t)} i_{\text{pri}(rms)}}{N\pi} \tag{11}$$

在磁芯非饱和状态下, 负载功率由线圈电压 $V_{\text{core}(t)}$ 决定。因此, 线圈次级电压最大值为:

$$V_{\text{core(max)}} = \frac{4NL_m i_{\text{pri}(rms)}}{T_{\text{pri}}} \tag{12}$$

代入式 (11) 可得负载侧最大获取功率为:

$$P_{o(\text{max})} = \frac{8L_m i_{\text{pri}(rms)}^2}{\pi T_{\text{pri}}} \tag{13}$$

综合上述分析可知, 若已知电缆最大电流与负载侧最大功率即可通过式 (13) 得出取能线圈电感值, 进而求得取能磁环大小与绕线匝数, 表 2 给出了取能装置工作极限条件与所设计取能线圈的具体参数。

表 2 取能线圈参数

参数类别	参数	数值
输入侧	电缆最大电流	50 A
	电缆电流频率	50 Hz
输出侧	负载最大电压	5.0 V
	最大输出功率	1.0 W
线圈	次级线圈匝数	100 匝
	内径/外径/高度	24/48/20 mm
	磁芯材料	1 K107 B

整流装置用以将取能线圈输出的交流电转化为直流电并经滤波后送入能量管理单元, 电路结构如图 3 所示。其中, 整流桥芯片型号为 MB10F-D (1 000 V/600 mA), 滤波电容采用 10 μ F 陶瓷电容。瞬态抑制二极管 U_2 用以限制滤波电容两端电压, 当取能线圈输出的能量满足负载需求且储能单元能量已满时, 多余的能量将通过 U_2 释放以避免电容电压过高损坏后续电路。 U_2 型号为 SMBJ5.0CA, 其最大耗散功率为 5 W, 高于取能线圈最大输出功率。

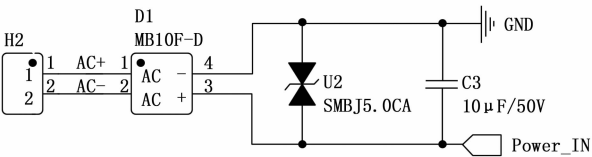


图 3 整流装置结构图

2.1.2 能量管理单元设计

在实际应用中, 取能单元的输出电压虽然被设置了上限, 但由于电缆电流幅值是随着负载的变化而变化的, 其输出电压也将在 0~5 V 间变化。然而, 测温装置中的温度采集与发送模块却对工作电压要求。因此, 需要能量管理单元实现不同大小电缆电流幅值下电源的

稳压与电能的分配。本文选用 ADI 公司型号为 ADP5901 的超低功耗能量采集器 (PMU)，其通过内部升压变换器配合芯片外围的电阻及电容即可完成能量收集、储能单元充电以及负载供电等功能。所采用的电路拓扑如图 4 所示。

可以看出, PMU 芯片 ADP5901 共有两个供电输出引脚, 分别为 SYS 与 REG_OUT, 均需并联 $4.7\ \mu\text{F}$ 陶瓷电容稳定其输出电压。其中, SYS 引脚为主供电引脚, 通过外置模拟开关 TS5A3169 与温度采集发送模块电源端相连接, 而模拟开关 TS5A3169 受 ADP5901 的 PGOOD 引脚控制, 当 PGOOD 引脚电平为高时, TS5A3169 导通为后续模块供电; 当 PGOOD 引脚电平为低时, 表示取能单元及储能单元的能量供给无法满足测温装置正常运行, TS5A3169 断开, 后续模块停止工作。PGOOD 引脚电平受 SETPG 及 SETHYST 引脚电压及内部滞回比较器控制, 比较器的门限宽度及上下限值由电阻 R_{G1} 、 R_{G2} 、 R_{GH} 决定。实际运行中, 比较器将 SYS 引脚电压与滞回上下限电压阈值相比较, 当 SYS 引脚电压高于上限阈值 $3.3\ \text{V}$ 时, PGOOD 引脚电平为高; 当 SYS 引脚电压低于下限阈值 $2.1\ \text{V}$ 时, PGOOD 引脚电平为低。

相较于 SYS 供电端, ADP5901 的 REG_OUT 引脚输出电压更为稳定, 其能够在储能模块未过放电保

护、PGOOD 引脚电平为高时提供最高 $3.6\ \text{V}$ 电压、 $260\ \text{mA}$ 电流的稳定输出。在本文的应用中, REG_OUT 引脚主要为温度传感器供电以确保采样精度, REG_OUT 输出电压通过在 VID 引脚外接 $55.6\ \text{k}\Omega$ 下拉电阻实现 $3.3\ \text{V}$ 输出。REG_OUT 输出能量的来源可以通过改变 REG_D0 及 REG_D1 两引脚电平进行控制, 当 REG_D0 电平为高时, REG_OUT 可以通过 SYS 端储能电容供电; 当 REG_D1 电平为高时, REG_OUT 可以通过 VIN 端升压供电。本文将 REG_D0 及 REG_D1 引脚通过上拉电阻与 MCU 通用 IO 相连接, 磁场取能充足情况下同时从 SYS 与 VIN 端汲取能量。

ADP5901 的 BAT 引脚用以外接储能单元, 通过将 BAT 引脚电平与 SETSD 引脚电压相比较实现储能模块保护。当 BAT 引脚电平低于电阻 R_{SD1} 与 R_{SD2} 分压后电平时, 储能模块不再向外放电, 避免其过放损坏。TERM 引脚电压为储能模块过充电阈值, 当 BAT 引脚电平高于电阻网络 R_{T1} 与 R_{T2} 分压后电平时, Boost 电路不再向储能模块充电, 避免储能单元过充损坏。考虑到后续温度采集发送模块工作电压范围, 储能单元过充与过放阈值分别设为 $5.0\ \text{V}$ 与 $1.8\ \text{V}$ 。

ADP5901 内部 Boost 变换需要在 SW 引脚外接 $22\ \mu\text{H}$ 电感协助升压, 考虑成本与体积, 本文选取的电感型号

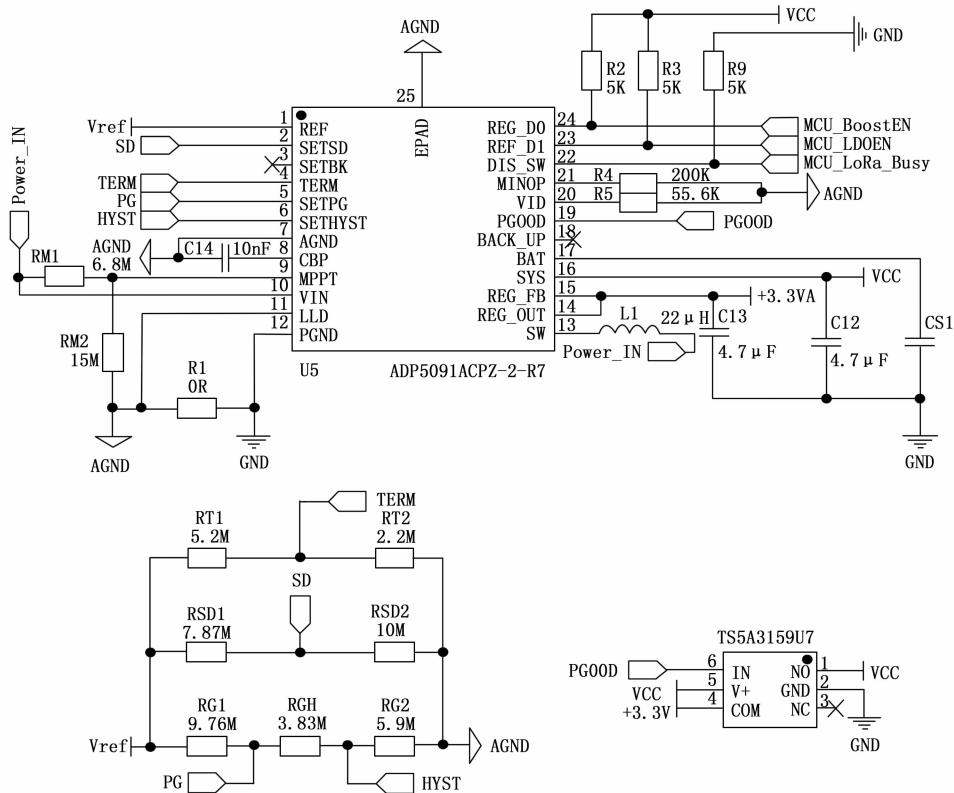


图 4 能量管理单元结构图

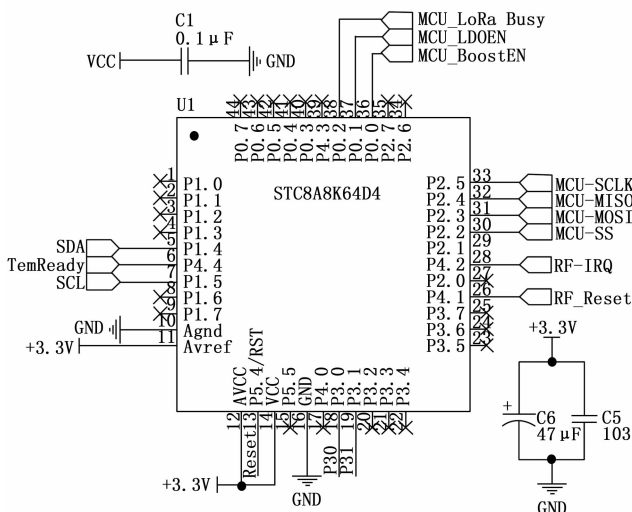


图 7 主控单元原理图

包括主控单元低功耗配置、测温单元配置以及信号发送单元配置。

3.1 主控单元低功耗配置方法

初始化后系统先检测取能装置输出电压，如果电压低于预设阈值 3.0 V，则 LoRa 通信模块无法正常工作，此时主控单元直接进入低功耗模式等待储能单元充电。主控单元在低功耗工作模式下仅需开启掉电唤醒定时器，该定时器耗电量为 1.4 μA 。低压检测模块在掉电与周期唤醒模式下的平均电流 $I_{\text{LVD(ave)}}$ 可由下式计算：

$$I_{\text{LVD(ave)}} = \frac{I_{\text{LVD}} \cdot t_{\text{LVDtest}}}{T_{\text{aw}}} \quad (15)$$

式中， I_{LVD} 为使能低压检测的掉电模式 MCU 工作电流 470 μA ， t_{LVDtest} 为低压检测所需时间 1 ms， T_{aw} 为唤醒周期，本文设置 T_{aw} 为 16 秒，由式 (4) 可得 $I_{\text{LVD(ave)}}$ 的值为 0.03 μA ，故整个 MCU 在掉电模式下平均电流共为 1.83 μA 。如果电源电压高于 3.0 V，则系统开启温度检测模式，并将测量结果与上一次比较，当二者差值低于预设温度阈值时，说明温度变化在允许范围内，无需启用功耗相对较大的信号发送模块，单片机再次进入低功耗模式以节省能量；当温度差值高于预设温度阈值时，单片机基于当前温度数据进行数据帧配置，加入测温节点 ID 和校验并传输至信号发送单元完成数据上传。数据结束后，MCU 需通过 IO 配置使温度传感器及信号发送单元进入休眠模式，并将当前温度数据写入 EEPROM，上述工作完成后 MCU 将再次进入低功耗模式，该模式下的外部 IO 能够保持配置后的状态。具体流程图如图 8 所示。

通过图 8 所示主控单元低功耗运行逻辑可以看出，当所设计的测温装置应用在工频电流较大、供电稳定、取能装置输出能量充足的环境中时，可通过减小掉电唤醒时长与缩小温度比较阈值的方式提升系统的测量精

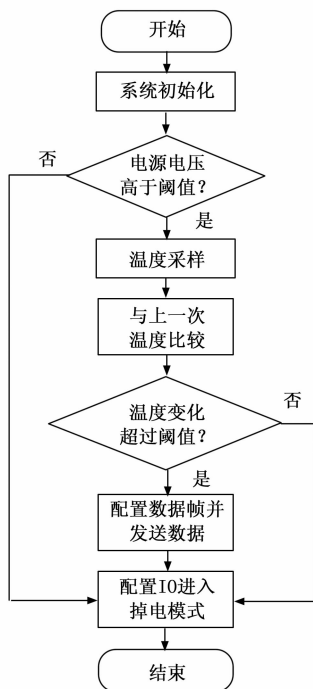


图 8 主控单元低功耗运行流程图

度；而当装置应用在工频电流较小且供电中断时间较长的环境中时，增加掉电唤醒时长并扩大温度比较阈值可以进一步降低整个测温装置的功耗，提升系统续航能力与供电稳定性。

3.2 测温单元配置方法

测温单元 TMP117 有两种工作模式，一种为连续工作模式，适用于无主控芯片时的周期性自主采样，芯片功耗较大。另一种工作模式为 One-shot 模式，该模式下 TMP117 在结束测温后马上进入休眠，休眠期间芯片工作电流仅为 250 nA，通过对其配置寄存器的 MOD 位写入 2b11 可再次唤醒温度传感器开启下一次测温。One-shot 工作模式下芯片测温周期受外部主控芯片控制，由于主控单元负责功耗逻辑处理，故本文令 TMP117 工作在 One-shot 模式下。主控单元采用查询方式检测其电位变化以确定测温是否完成，具体运行过程如下。

1) 初始化流程：测温装置上电后，单片机通过 I²C 总线首先将 TMP117 的解锁寄存器 EUN 位置 1 以开启 EEPROM 写入功能，随后向配置寄存器写入 TMP117 工作模式、ALERT 引脚初始电位并延迟 7 ms 等待数据写入。当全部初始化数据写入完成后软件重置 TMP117 使其以配置模式开始运行。

2) 测温流程：当测温装置工作后，单片机通过 I²C 总线首先将 TMP117 的配置寄存器 MOD 位写入启动命令，随后查询 ALERT 引脚电平状态，当 ALERT 引脚电平翻转时，表明温度采样完成，MCU 读取温度

寄存器数值并完成后续处理。温度数据形式为 16 位有符号二进制数, 实际温度 T_{test} 可由下式计算:

$$T_{\text{test}} = (-1)^{\text{MSB}} \cdot T_{\text{dat15}} \cdot 0.0078125(^{\circ}\text{C}) \quad (16)$$

式 (16) 中, MSB 为测得数据最高位, T_{dat15} 为剩余 15 位。

3.3 信号发送单元配置方法

由于测温装置与基站间的通信是单方向的, 故信号发送单元 Ra-01 的工作模式仅在低功耗模式、待机模式以及发送模式中切换。其中, 低功耗模式下模块功耗电流仅为 $0.2\text{ }\mu\text{A}$, 且仅允许单片机通过 SPI 通信访问配置寄存器以切换工作模式。发送模式下模块将数据通过天线向接收端传输, 并在一帧数据发送完成后拉高 DIO0 引脚电平提示主控单元。期间功耗电流较大可达 120 mA, 因此, 模块需要通过适时切入低功耗模式的方式优化系统功耗。待机模式用于数据配置, Ra-01 仅允许待发送的数据在待机模式下写入缓存。Ra-01 在完成一帧数据发送后将自动进入待机模式, 主控单元在检测到数据发送完成后将 Ra-01 切入睡眠模式以降低模块功耗, 待有新的温度数据需要传输时, 再激活待机模式重新写入数据。

由于一个测温基站需要同时收集多个测温结点的温度信息, 因此测温模块发送的数据不能为单一的温度, 还要包括信息长度、节点号以及校验码等。本文设计的通信数据帧在 LoRa 数据帧的数据负载部分采用了自定义的格式, 一帧数据长度为 15 字节, 各字节内容如表 3 所示。

表 3 测温装置与基站通信自定义协议帧格式

LoRa 数据帧	前导码	报头	数据负载			校验码
自定义数据			长度	节点号	温度	
长度(字节)	10	0	1	1	2	1

4 实验结果与分析

4.1 实验装置与实验平台

所设计的电缆测温装置如图 9 所示, 为验证该测温装置性能, 搭建了如图 10 所示的大电流实验平台。其中, 大电流发生器外接 80 mm^2 电缆多股单芯电缆用以模拟实际工况。示波器 (SDS824X 200 MHz/2 Gsa/s)

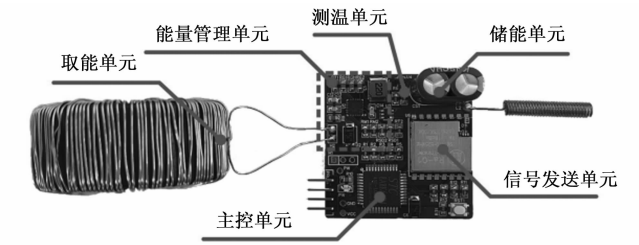


图 9 电缆测温装置

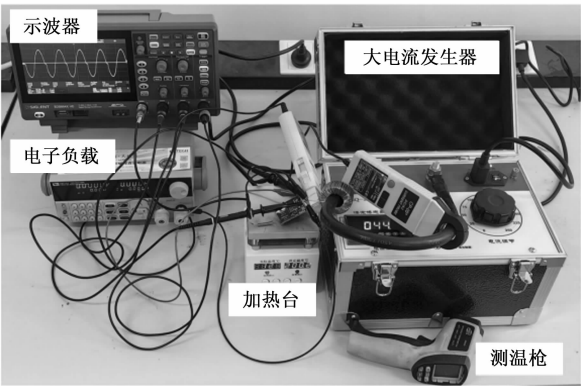
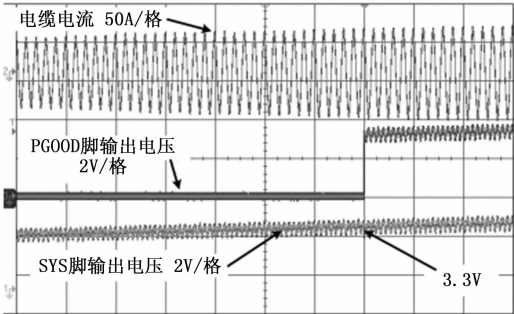


图 10 实验平台

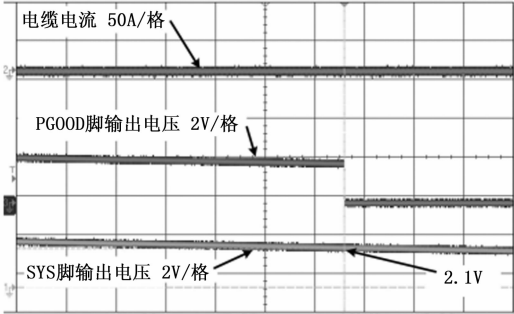
配合交流电流探头 (CP-05 200 kHz/400 A) 用以测量电缆工频电流; 电压探头 (N2140A 200 MHz/300 V) 及霍尔电流探头 (ETA5540C 100 MHz/40 A) 分别用以采样输出端电压电流波形; 直流电子负载 (IT8511A 150 V/30 A) 接在能量收集管理模块输出端用以模拟多工况负载。加热台用以给定外界温度, 测温枪 GM900 用以核对测量结果。实验条件与表 2 一致。

4.2 能量收集管理模块实验结果与分析

图 11 给出了能量管理单元启动与关断瞬态电缆电流、SYS 引脚输出电压、PGOOD 引脚输出电压波形图。从图 11 (a) 可以看出, 当能量管理单元输出电压为 3.3 V 时, PGOOD 引脚输出高电平并接通模拟开关为负载供电。反之, 如图 11 (b) 所示, 当电缆电流降低时, 电源模块输出电压逐渐降低, 当输出电压低于预设阈值下限 2.1 V 时, PGOOD 引脚输出低电平断开模



(a) 启动波形

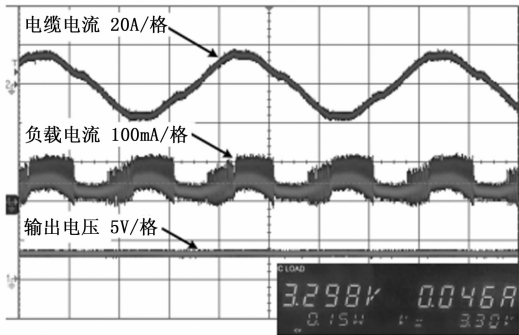


(b) 关断波形

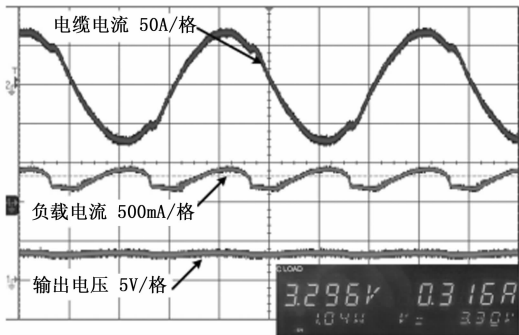
图 11 能量管理单元启动与关断波形

拟开关以停止对负载供电。

图 12 给出了一次侧电缆电流分别为 10 A 与 50 A 时, 恒压电子负载的电流波形及耗散功率。可以看出, 当输入电流为较小值 10 A 时, 能量收集管理模块能够将负载电流有效值稳定在 46 mA, 负载耗散功率为 0.15 W。而当输入电流增大至 50 A 时, 负载电流能维持在 316 mA, 负载耗散功率可达 1 W, 满足应用需求。图 13 进一步给出了一次侧电缆电流与负载耗散功率间的关系, 可以看出, 取能单元输出功率随着电缆电流的增大而线性增加, 与前文理论分析一致。



(a) 电缆电流10A时输出波形



(b) 电缆电流50A时输出波形

图 12 恒压负载下能量收集管理模块输出波形

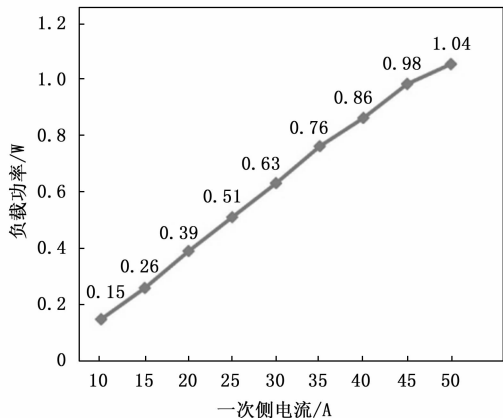


图 13 电缆电流与取能单元输出功率间关系

4.3 温度采集发送模块实验结果与分析

为验证测温装置的温度信号发送功能, 采用 USB-LoRa 转换器将接收到的无线信号转换为串口信号, 并通过上位机软件在电脑端显示。图 14 所示为正常接收到测温信号后的上位机显示界面。其中, 框内的数据为电脑端接收到的数据, 其定义如第 3.3 节所述, 首字节为总有效数据字节数用于校验, 第二字节为发送端节点号, 最后两字节数据为测温模块测得的实时温度数据。实验结果表明, 所设计的信号发送单元能够实现所需通讯功能。

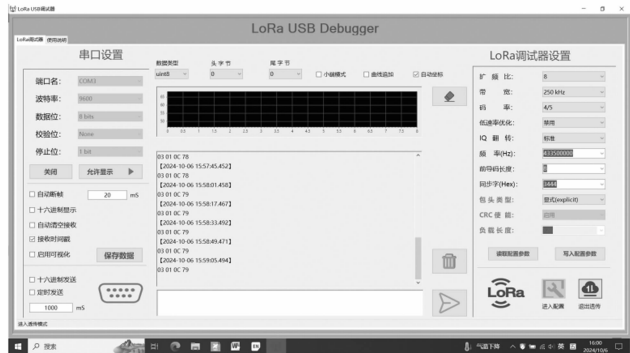


图 14 上位机接收数据界面

图 15 给出了采用加热台设定外部温度时, 所设计测温装置与红外测温枪测量结果对比图。其中, 横轴坐标值为温控台给定温度, 两柱状图分别为测温装置上传数值与红外测温枪读取数值。从图 16 可以看出, 测量值与红外测温枪读数最大差值为 0.9℃, 测量差异部分来源于测温点位置偏差及温控台表面温度不均等原因。

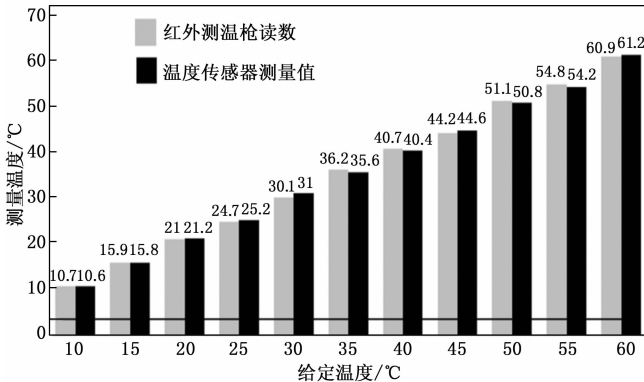


图 15 测温结果对比

为进一步验证所设计测温装置长时间运行的稳定性与可靠性, 本文将令测温装置长时间工作于电流为 40 A 的电缆表面, 并将测得的数据上传并存储于如图 16 所示的自研基站中, 实际运行数据及温度波形如图 17 所示。可以看出, 所设计的测温装置具备长期稳定运行能力。

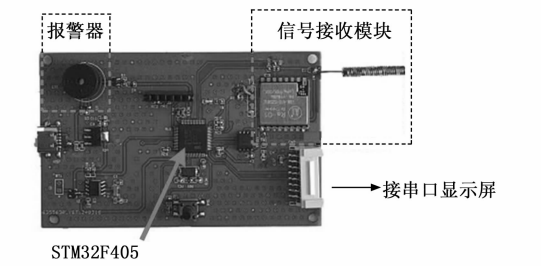


图 16 数据基站

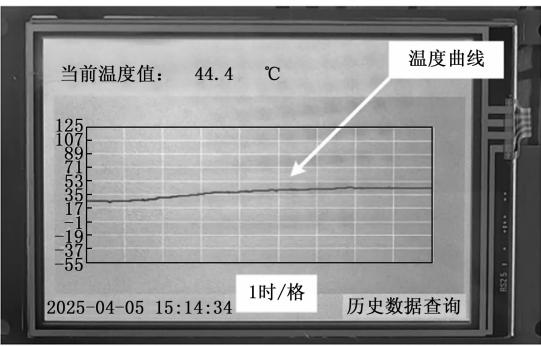


图 17 基站收集数据曲线图

5 结束语

电缆作为军事装备等传递能量与信息的关键设备，其运作状况对装备稳定运行起着重要的作用。电缆温度是直观展示电缆老化程度的重要参量之一，精确且稳定的电缆温度监测系统具有广阔的应用前景。本文以电缆温度为研究对象，聚焦电缆测温过程中存在的供电问题及功耗问题，提出并制作了一种基于磁场能量收集技术的无线电缆温度实时检测装置。该装置摒弃了传统有线供电方式，通过磁场取能的方式实现了无线自供电，同时可将测得的温度数据筛选比对后远距离上传。在后续的工作中，将侧重于多测温结点组网方式的研究，以实现复杂环境下电缆网络的多结点温度实时检测，同时也为构建全面且可靠的远程智能军备监测系统提供可靠的底层设备支持。

参考文献：

[1] 骆国铭, 陈章国, 吴海江, 等. 智能电网环境下的电力调度安全运行监控方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (10): 108 - 113.

[2] 郑 仟. 基于多旋翼无人机的架空输电线路状态检测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (12): 332 - 338.

[3] 花国祥, 高 峰, 肖 杨, 等. 面向架空输电线路的防外破装置设计 [J]. 国外电子测量技术, 2024, 43 (2): 183 - 192.

[4] 邓繁盛, 李秀峰, 丁志鹏, 等. 温度对电缆终端界面应力影

响的仿真研究 [J]. 高压电器, 2024, 60 (11): 101 - 109.

[5] 龚华勇, 杨国涛, 严鹤翔. 不同压力和温度下电缆用乙丙橡胶绝缘的极化电流研究 [J]. 绝缘材料, 2023, 56 (10): 91 - 97.

[6] 潘国斌. 温度对电线电缆绝缘材料机械性能的影响 [J]. 电工技术, 2022, (5): 183 - 184.

[7] 徐四勤, 黄向前, 杨 昆, 等. 基于温度以及运行数据的电缆接头绝缘劣化状态预测 [J]. 计算机科学, 2022, 49 (10): 132 - 137.

[8] 祝建军, 戴显康, 陈露露, 等. 基于弱磁探测技术的高压海底电缆精确定位系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (8): 38 - 43.

[9] 董海迪, 张 瑞, 王浙娜, 等. 基于时域反射法的电力电缆网络故障诊断方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32 (3): 30 - 36.

[10] 徐 研, 陈文教, 胡成乐, 等. 基于物联网技术的高压输电电缆故障定位方法 [J]. 物联网技术, 2025, 15 (2): 29 - 31.

[11] 王彦文, 张旭然, 高 彦, 等. 三芯矿用电缆线芯温度预测及故障预警方法 [J]. 煤炭学报, 2023, 48 (3): 1439 - 1448.

[12] 庄会慧, 杨 志, 戴润峰, 等. 卫星地面电缆便携式测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (7): 19 - 23.

[13] 李 鸿, 冯 朝, 肖建聪, 等. 面向地下电缆沟智能巡检机器人的紧耦合 SLAM 系统 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32 (6): 248 - 255.

[14] 马一博, 石 勇. 轨道交通供电系统电缆故障在线定位技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (1): 20 - 23.

[15] 杨 志, 王建军, 张桂英, 等. 小卫星地面供电电缆温度监测系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (7): 47 - 50.

[16] 吕 安. 煤矿高压电缆温度红外在线监测技术应用 [J]. 矿业装备, 2022, (1): 54 - 55.

[17] 贾宏满, 李 腾, 孙铁铮, 等. 基于红外技术的远距离电缆测温装置研制 [J]. 东北电力技术, 2023, 44 (10): 17 - 20.

[18] 林静怀, 尚雯珂, 陈 珂, 等. 基于卷积神经网络的电力电缆分布式光纤温度传感系统降噪方法的研究 [J]. 电工电能新技术, 2024, 43 (5): 104 - 112.

[19] 李子秀, 郭怀龙, 郭 兵, 等. 10 kV 环网柜电缆终端温度在线监测装置 [J]. 电工技术, 2024, (21): 145 - 146.

[20] 李 岩, 刘玉娇, 胡 凡, 等. 电力电缆接头温度异常故障远程在线监测系统的设计 [J]. 自动化技术与应用, 2024, 43 (6): 90 - 93.

[21] 王 涛, 吴素浓. 基于 DS18B20 的电缆设备电气接点温度预警系统设计 [J]. 西安工程大学学报, 2021, 35 (6): 69 - 75.