

架空线路雷电计数器远程监测系统研究

目前变电站和架空线路仍普遍采用机械式雷电计数器进行雷击计数,存在着因为没有电信号接口而无法实时传送雷击次数信息的困难。于是,改进了机械式雷电计数器结构,并设计了一套基于GSM通信方式的远程监测系统。首先,在机械式雷电计数器内部增加红外光电传感器来采集雷击次数信息,并以DSP作为微处理器单元的核心,识别光电传感器的输出信号,然后通过串口控制GSM模块向通信终端发送短消息,并形成Excel数据,短消息内容包含雷击时间、地点及雷击次数等信息,便于后期对数据的分析和处理。另外,还设计了用于该监测系统的电流互感器在线取能电源,完成了器件选型、硬件调试以及实验测试等工作。该电源可输出稳定的5V电压,实现了对监测装置长期稳定地供电。最后,对监测装置进行了防晒、防雨、防腐蚀封装,并进行了防电磁干扰和防高温工作环境的实验测试,结果表明系统装置可以稳定可靠运行,实现了预期的智能雷电监测功能。

胡国辉¹ 赵轶¹ 张德卿² 熊兰² 马龙² 杨子康²/1.重庆市计量质量检测研究院
2.重庆大学输变电设备与系统安全及新技术国家重点实验室



胡国辉/高级工程师

0 引言

架空输电线路地处旷野,自然和地理条件十分复杂,输电线路和杆塔容易遭受雷击^[1-4],从而引起大面积的停电事故,给国民经济和人民生活带来重大损失。合理的雷电防护系统设计是实现防雷减灾的一种重要途径,而雷电防护系统接闪的雷击次数则是评价该系统雷电防御能力的一个重要指标,雷电计数器测量结果不仅可以直观地反应雷电防护系统对直击雷的接闪能力,同时为确定雷电灾害类型、划分建筑物防雷等级提

基金项目:国家自然科学基金(51077139);
重庆市电器检测工程技术研究中心(cstc2011pt-gc70009)

关键词/Keywords

雷电计数器 ·
DSP ·
远程监测 ·
GSM ·
取能电源 ·

供依据。

然而,目前普遍安装的机械式雷电计数器^[5-6]与避雷器一起安装在线路杆塔上,需要巡线人员定期查看并记录计数器所标示的雷击次数,耗费了大量的人力物力,十分不便。因此,有必要设计一套专门用于架空线路或者无人值守变电站的雷电计数器远程监测系统,通过增加雷击次数的远程信息传送功能,减少工作人员的巡线频次,提高工作效率,并且便于数据保存和处理,最终实现实时、准确的雷击警示,保证快速、高效率地检修与维护设备。

1 系统模块构成与功能

1.1 机械式雷电计数器

目前国内变电站和输电线路的避雷器监测多采用专用电磁式机械计数器进行雷击计数。如图1所示的JS-8型动作计数器应用比较广泛。其中 R_1 为非线性电阻,C为储能电容器,L为计数器线圈, $VD_1 \sim VD_4$ 为硅二极管。遭受雷击时避雷器动作,高温阀片 R_1 上的压降经桥式整流对电容器C充电,然后C再对电磁式计数器的线圈L放电,使L流过电感电流,感应出电磁场,磁化内部铁芯,吸合衔铁使计数器指针转动,完成计数。

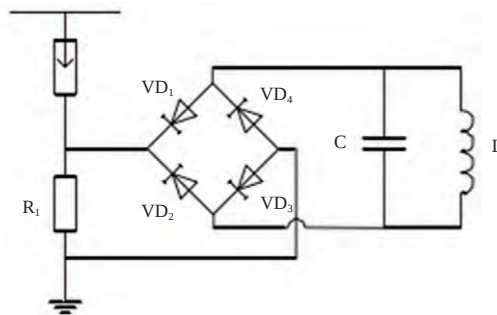


图1 JS-8型动作计数器的原理接线

1.2 系统构成

本文提出的雷电计数器远程监测系统的系统框图如图2所示。系统由计数器机械传动机构、红外光电传感器、微处理器单元、GSM通信模块、通信终端、电压监测电路、稳压电路和取能电源等部分组成。其中,计数器机械传动机构通过遮光片作用于红外光电传感器,红外光电传感器的输出与微处理器单元连接,微处理器单元通过串口与GSM通信模块连接,GSM通信模块通过GSM网络将相关信息发往通信终端(例如手机),取能电源配合稳压电路分别为监测系统各电路提供匹配的直流电源,电压监测电路输入端和输出端分别连接取能电源与微处理器单元。其中,微处理器单元还通过继电器控制GSM模块电源的通断,只有在GSM模块需要工作时才能接通电源,在非工作状态下则断开电源,从而节省整体装置的功耗。

1.2.1 信号采集与输出

系统的信号采集与输出功能由机械传动机构以及红外光电传感器实现,其电路结构分别如图3和图4所示。机械传动机构由JS-8型机械式雷电计数器和遮光片组成,而红外光电传感器则是由H206型槽型光耦和比较电路LM393组成。正常情况下,机械传动机构的遮光片位于槽型光耦的槽外,光电管处于导通状态,比较电路输出低电平。当雷击发生时,计数器采集到雷电流并磁化内部铁芯,吸合衔铁,衔铁除通过传动机构使计数表盘转动一次之外,还使与之直接相连的遮光片做一次直线往返运动;当其运动至光耦槽内时,挡住光路,则光电管截止,比较电路输出高电平,通过微处理单元采集此输出信号即可实现计数。实验表明,遮光片采用超轻的不透光金属薄片,不会对机械式雷电计数器本身计数产生任何影响。

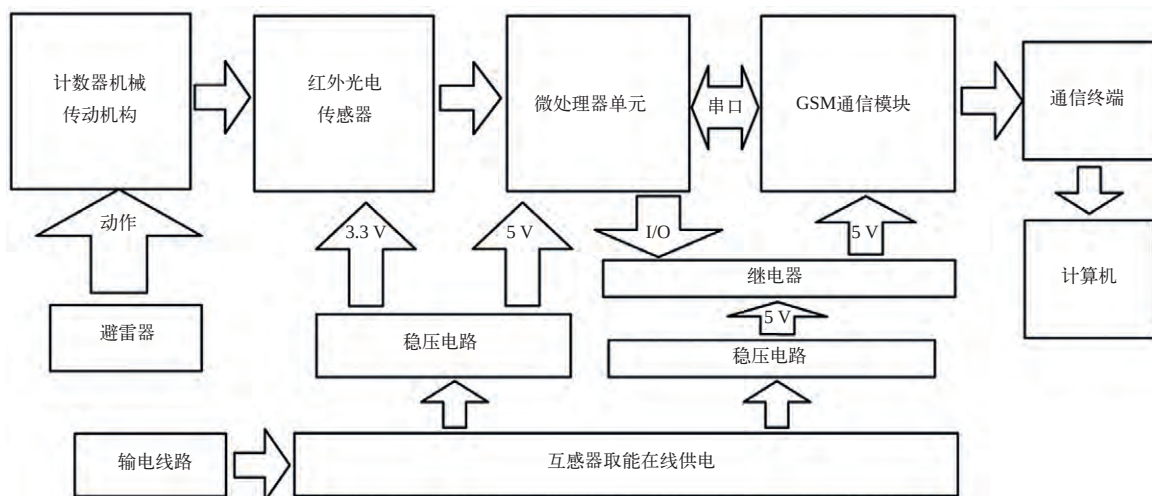


图2 系统整体框图

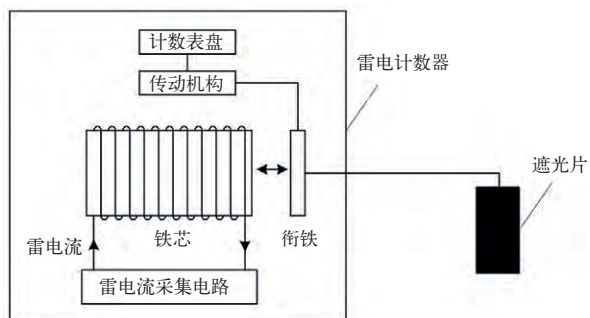


图3 计数器的机电工作原理机构示意图

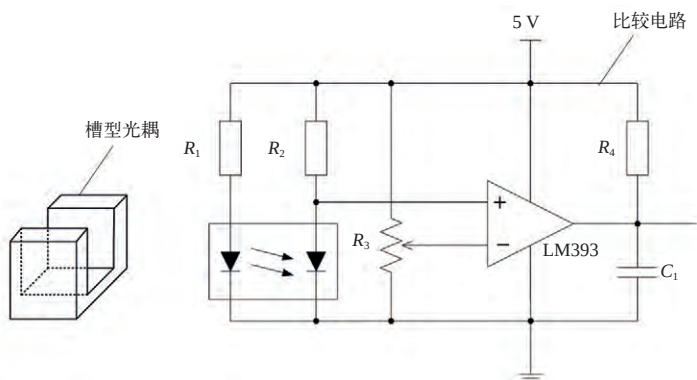


图4 H206型光电耦合计数模块电路图

1.2.2 微处理器单元

本系统的微处理器单元采用TMS320F2812的DSP控制器，主要用到以下5个功能模块。

(1) CPU定时器

该定时器实现了在正常运行状态下每周定时向通信终端报告系统工作正常，即定时的时间间隔设置为一周，每当定时器计满一周时，通过CPU控制GSM通信模块向通讯终端发送系统工作正常的信息。

(2) 串口

串口主要用于控制GSM的通信。在计数器动作时，CPU接收到红外光电传感器的输出电平并产生外部中断信号，通过串口将相应短信息发送指令传到GSM模块，使其开始工作，发送雷击计数信息。另外，在固定的时间间隔定时器溢出时，也通过串口控制GSM发送装置是否正常工作的信息。在装置初始化或者重启时，也通过串口以相同的方式发送相应的信息，即串口起着连接处理单元与发送端的重要作用。本系统中具体使用到的串口为SCIB，通过DSP的TX引脚将发消息的指令传送到GSM模块，实现短消息的发送功能。

(3) GPIO（通用输入输出）

GPIO在本系统中用于控制GSM的电源开关，开关器件为一个继电器。在不需发短信时，GSM不工作，此时继电器断开，切断电源供电，减少电能损耗。而当遭遇雷击或者其他需要发送信息时，CPU通过GPIO输出电压信号来接通继电器，为GSM提供正常工作时的电源电压。流程为：当需要GSM模块发送短消息时，CPU通过引脚GPIO0发送一个电平信号，使继电器的内部电路接通，进而将5V的供电电压接到GSM的电源输入端，使其开始工作并发送短消息。

(4) XINT1(外部中断)

外部中断在本系统中主要用于接收光电传感器的计数信号。当所配置某引脚为外部中断源时，若该引脚出现波形动作（上升沿、下降沿），则会在系统内产生中断，实现雷电计数检测。流程为：当避雷器遭受雷击，雷电流使计数器的指针发生转动，红外光电传感器的槽型光耦被遮挡，输出高电平，从而在与之相连接的微处

理单元的GPIO9引脚上产生一个上升沿，使系统内产生中断，CPU即可检测到该中断信号，并作出相应的处理，控制GSM模块发送相应的短消息。

(5) 低功耗模式

本文中使用了微处理器单元的低功耗模式，使DSP在正常情况下处于低功耗状态，减少整个装置的功耗。此低功耗模式为睡眠模式，退出条件为任何被使能的中断XNMI。在低功耗模式下，只有DSP及其内部时钟在运作，其他模块均处于休眠状态，而当产生任何一个使能的外部中断时，系统退出低功耗模式，保证正常工作时各模块均能良好运行。

1.3 GSM通信模块

在确保监测现场已被GSM网络覆盖的情况下，本机采用GSM网络作为信道，将短消息作为数据发送方式。

本文采用的TC35i新版西门子工业GSM模块工作电压为3.3~5.5V，可以工作在900MHz和1800MHz两个频段，功耗分别为2W和1W。微处理器对GSM模块的控制采用的是AT命令。GSM模块发送短消息的主要流程如下。

1) 发送“AT+CMGF=1”，将短信模式设置为Text模式。

2) 发送“AT+CMGS=手机号码”，进行目标手机的设置。

3) 输入要发送的字符串，雷击时发送的短消息内容为“Lightning+1”，系统重启时短消息内容为“Restart”，每周发送系统正常工作的短消息内容则是“Normal”，最后以“→”结尾。

GSM模块的启动时间由微处理器的定时器中断进行控制。当定时器中断溢出的总次数在时间上与预设时间相等时，则启动模块进行装置工作运行正常的信息发送；如遇雷击的情况，则由判断语句立即执行发送任务。

2 系统供电电源

2.1 取能电源的设计思路

鉴于输电线电流波动范围比较大，本文在输电线电流较大导致取能过剩时，采取反馈控制式的泄能方式，以保证CT取能电源保持平稳输出；

在输电线电流很小导致取能不足时,选择超级电容结合锂电池的方式进行储能,作为备用电源,以保证CT取能电源没有供能死区。另外,为防止CT工作在深度磁饱和状态,在二次侧产生尖峰脉冲电压,威胁取能电源的安全,本文采取了铁芯开气隙的方法防止CT饱和^[7-9]。

取能电源所用到的取能电流互感器为穿心式,输电线路从互感器中间穿过,一次侧匝数为1匝,二次侧接入包含有整流、滤波、稳压等电路的电能处理模块及监测设备,等效阻抗不为0,此时CT二次侧既输出感应电流,又输出感应电压,向电能处理模块及监测设备(统称负载)输出功率,实现“取能”。CT取能电源^[9]的基本结构如图5所示。

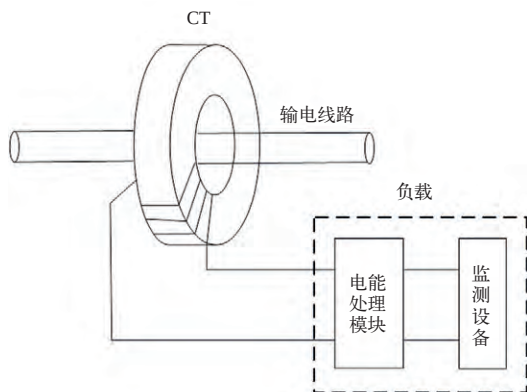


图5 取能电流互感器

CT截取能量的输出通道优先级应首先保证能量用在监测设备上,如有多余能量则为锂电池充电,最后将剩余能量通过泄流开关进行泄放。根

据以上分析,结合超级电容与锂电池,设计了输出电压5 V的CT取能电源,其整体结构框图如图6所示。

图中继电器I与继电器II均为单刀双掷开关。通过控制两个继电器开关所处的位置使电源工作在不同的状态。当继电器I和继电器II均处于位置②时,则取能CT通过超级电容同时为监测设备供电和锂电池充电。当继电器I位于位置②、继电器II位于位置①时,取能CT通过超级电容只为监测设备供电。当继电器I与继电器II均处于位置①时,锂电池为监测设备供电。取能CT吸收的过剩能量通过开关管进行泄放,降压稳压模块将超级电容电压转换为5 V直流电压,储能电容保证继电器I在切换过程中监测设备不断电。

2.2 电路搭建及测试

完成器件选型后,按照图6所示结构搭建电路,由于本文设计的取能电源主要通过将CT套在高压线路上,利用其感应出的能量为监测设备供电。受实验条件所限制,不能直接将CT套在高压母线上,因此搭建了实验平台(见图7)进行模拟实验。

变压器原边接入220 V市电,副边电压可在0~250 V范围内调节,负载最大电流为4 A。当负载接通电源时,将载流导线对CT重复穿心 N 次,设流过每根导线的电流为 I_R ,则CT一次电流近似于 NI_R ,以此来模拟线路大电流对取能电源进行测试^[10],最大可达800 A。电源在线路电流大范围变化时的输出电压测试如下表所示。

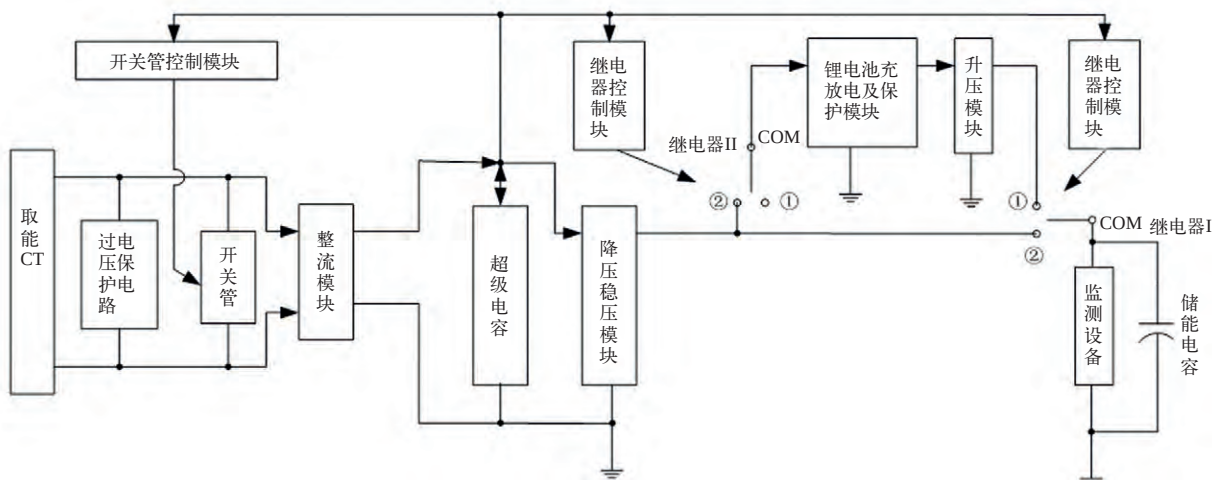


图6 CT取能电源整体结构框图

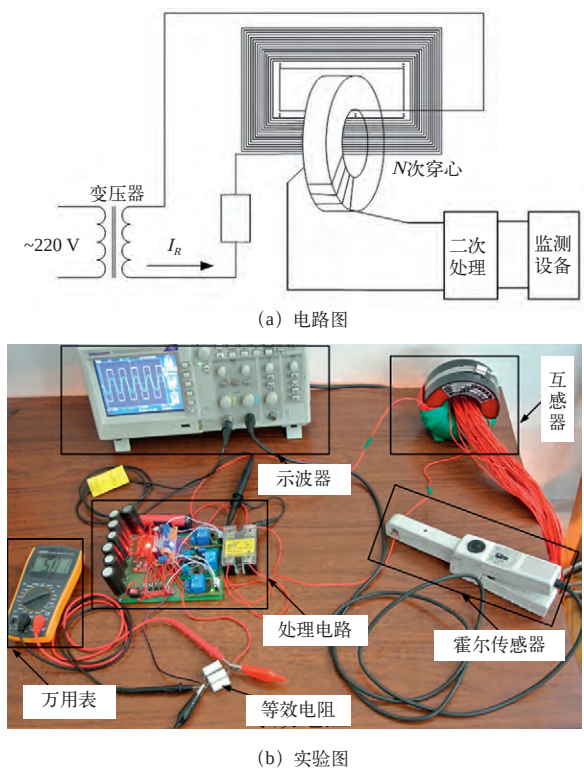


图7 模拟实验平台

表 当线路电流大范围变化时电源的整体测试

一次电流/A	输出电压/V	输出功率/W
0	5.03	2.53
10	5/5.03	2.5/2.53
30	5/5.03	2.5/2.53
50	5/5.03	2.5/2.53
70	4.99	2.49
90	4.99	2.49
110	5	2.5
130	5	2.5
150	5	2.5
$160 \leq I_1 \leq 800$	5	2.5

由表可知，线路电流在0~800 A范围内变化时，取能电源均可输出5 V的稳定电压，满足系统

的供电需求。

3 实验测试

3.1 系统组装及调试

通过对监测系统各模块进行分析后，确定了相应的电路结构和器件选型，并按照设计方案进行了各个功能模块的搭建，最终完成了整个系统的研制。因为雷电计数器直接取自现场，故可以保证其可以正常工作，即线路遭受雷击时，雷电流流过避雷器，计数器可以正常工作并动作。在此基础上进行实验调试，即可避免为产生模拟雷电流而使用冲击电流发生器的不便，仅考虑雷电计数器动作时该远程监测装置是否正常工作即可。整体联调实验接线图如图8所示。

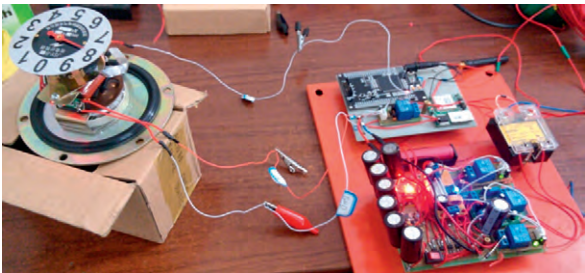


图8 实验调试接线图

将雷电计数器上固定的红外传感器输出与DSP相连接，取能CT上挂套多圈紧密缠绕的导线，模拟输电线路大电流。当调节调压器的电压逐渐增大时，导线电流逐渐增大，电源模块的输出电压也随之增大，最后趋于稳定。这时，各装置电源信号指示灯均正常亮起，说明取能电源正常供电，各部分装置正常工作。此时DSP开始运作，手机收到初始化信息“Restart”。此时，手动操作雷电计数器，使衔铁与电磁线圈吸合碰触，计数器的计数表盘上的指针会转动一格，雷电计数增加一次。同时，DSP退出低功耗模式，开始寻找信号，在间隔30 s后发送第一条雷击信息，如果之后计数器仍有连续的动作，由于此时DSP已经退出低功耗模式，系统正常运行，故只需2~3 s即可发送下一条雷击信息，手机会收到“Lighting+1”的短消息内容。以上过程表明DSP检测到了模拟的雷击动作信息，并控制GSM模块发送了短消息。

在没有发送短消息任务时，整个系统只有红

外光电传感器、DSP的CPU及其内部时钟处于工作状态，其他模块均进入休眠状态。一旦有外部中断产生（例如红外光电传感器动作或者定时器溢出），DSP退出低功耗模式，执行相关任务，最大限度地减少了整个系统的功耗。在测试过程中，观测各模块的电源信号指示灯证明了DSP对各模块的低功耗控制均能良好实现。

利用手机辅助类软件可将短信息导出，并生成Excel文件。模拟实验时手机收到的部分雷击信息及时间如图9所示。图中，联系人的备注可设为具体装置安装地点的名称或者代号，方便后期工作人员的查阅雷击地点，如设置联系人为“重庆”，则Excel表格中对应的联系人一栏即为“重庆”地点信息。在时间一栏显示的是手机收到信

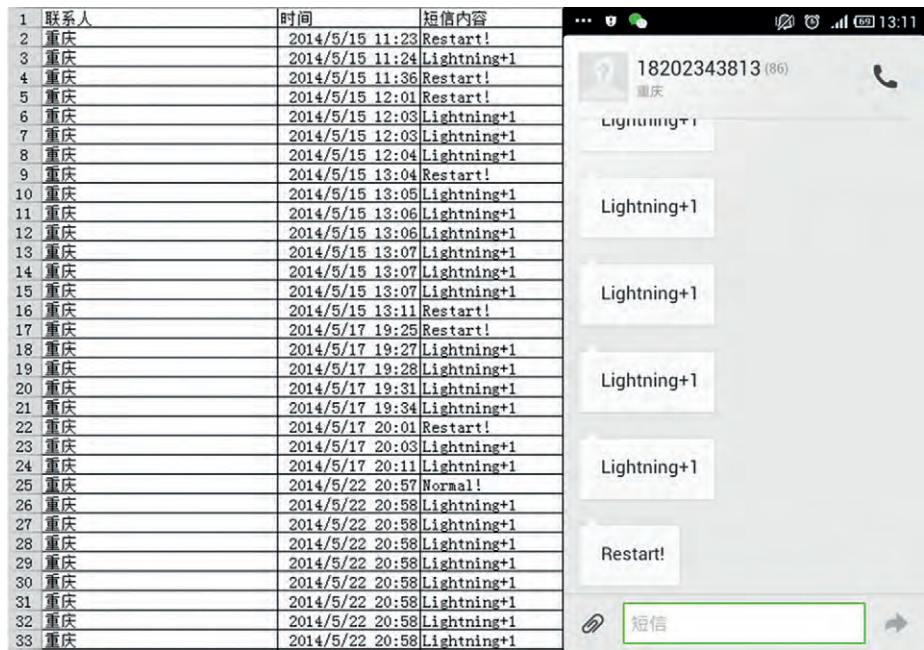


图9 监测终端接收到的雷击信息

息的时刻（最小单位是分），满足信息传输的实时性。右侧图片为手机接收短信息页面截图，可见时间、地点、短信内容与Excel表格所示完全一致。从Excel表格中可以看到，在2014年5月15日进行了测试实验后，经过一周的时间间隔，收到了内容为“Normal”的短消息，从而验证了第三种短消息（即校验装置是否正常工作）可以正常发送，整机调试运作无误。

经整体实验调试，监测装置运行良好，能在雷电计数器动作时及时地将雷击信息发送到手机终端，且累计的雷击信息可以方便地导出，便于工作人员对数据进行统计和处理。

3.2 防干扰测试及封装

为了确保该装置在户外也能稳定运行，进行了模拟电磁干扰环境和高温环境下装置的测试工作。电磁干扰源为自制的多匝线绕线圈，通电后可产生恒定电磁场，频率为10 kHz。将整机放置

于干扰线圈旁，进行整体联调实验，实验结果表明各模块正常工作，与室内模拟实验的整体联调无明显差别。

重庆地区夏季户外最高温度可达60℃，有必要进行热实验。不断地将热风（分别为30℃、40℃、50℃和60℃）送至整机的金属箱壳，并用便携式红外测温仪实时监测装置整体温度，进行整体联调实验。测试表明，在60℃及以下温度环境下装置运行正常，没有受到影响。

考虑到整机要安装到户外，故将其封装固定在一个防雨、防晒的户外用配电箱中，该配电箱长300 mm、宽70 mm、高440 mm，外部喷刷一层防腐蚀、防生锈的保护漆，整体封装如图10所示。

整机的内部模块质量很轻，重量集中在金属箱壳上，而该户外用配电箱完全符合户外安装的要求，故整机质量不影响现场安装。

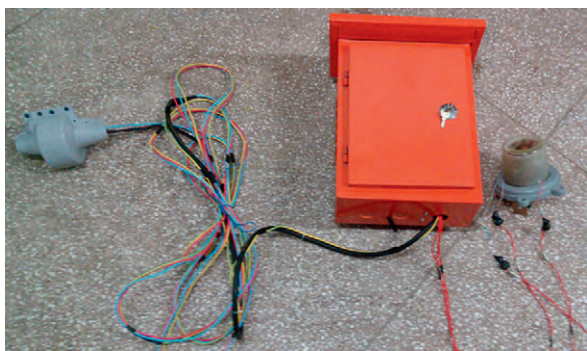


图10 整体装置封装

4 结束语

针对输电线路机械式雷电计数器数据查询不便、耗费大量人力物力的现状,设计了一套输电线路雷电计数器远程监测系统,具体结论如下。

1) 在原有雷电计数器结构上增加了遮光片和红外光电传感器,实现了将计数信息转换为电信号输出。

2) 实现了DSP对红外光电传感器输出信号的采集,对GSM模块电源的控制,对各模块工作状态的监测,以及对整机低功耗模式的设置。

3) 利用GSM模块实现了不同情况下向通信终端发送短消息的三种模式,即遭受雷击时发送“Lighting+1”,DSP复位或者装置重启时发送“Restart”,每隔一周的时间发送装置正常工作的信息“Normal”。

4) 导出手机接收到的短信息,并生成Excel数据文件,在计算机上实现对雷击次数、时间以及地点等信息的有效统计,经测试整体过程方便快捷,实用性强。

5) 完成了监测系统在线取能电源的研制,包括器件选型、电路分析、硬件搭建以及实验测试等工作,测试结果表明所研制的取能电源可以输出稳定的5 V直流电压,能够实现长期稳定的供电。

6) 最后对整机进行防雨、防晒、防腐蚀的封装处理,实验测试数据证明,各环节工作正常,实现了预期的监测功能。

参考文献

- [1] 刘晓东. 110 kV 线路几起雷击故障分析及其对策[J]. 高电压技术, 2002, 28(9): 52-53.
- [2] 陈家宏, 张勤, 冯万兴, 等. 中国电网雷电定位系统与雷电监测网[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 425-431.
- [3] 易辉, 崔江流. 我国输电线路运行现状及防雷保护[J]. 高电压技术, 2001, 27(6): 44-45.
- [4] A. J. Ericsson. The incidence of lightning strikes to power line [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(3): 871-886.
- [5] 肖文明. 氧化锌避雷器的测试探讨[J]. 高电压技术, 1998, 24(3): 41-43.
- [6] 李喜平, 陈庆国, 王吉涛, 等. 氧化锌避雷器远程状态监测系统[J]. 黑龙江科技信息, 2009, (14): 4.
- [7] 李先志, 杜林, 陈伟根, 等. 输电线路状态监测系统取能电源的设计新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 76-80.
- [8] 王书瑶. 电网高压在线监测系统供电电源的设计[J]. 电源技术, 2012, 36(8): 1196-1198, 1220.
- [9] 熊兰, 何友忠, 宋道军, 等. 输变电线路在线监测设备供电电源的设计[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2252-2257.
- [10] 辛守乔, 肖立业, 张国民, 等. 悬浮电源功率与唤醒电流及绕组的关系[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 85-89.

(收稿日期: 2015-05-15) EA

作者简介

胡国辉(1975-), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 主要研究方向为电子电气设备故障检测与分析、计算机测量控制。

赵轶(1981-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电子电器产品的检测方法和检测技术研究。