

基于WSN和露点控制的开关柜防潮系统研制

为解决开关柜内的凝露问题，研制了一套基于WSN和露点控制的开关柜防潮系统，由监控终端、无线传感器网络和上位机软件组成。系统采用基于露点控制算法的防潮方案，能够预防凝露积水，同时建立基于ZigBee技术的无线传感器网络实现与上位机的信息交互，避免有线通信施工量大、走线困难等问题。具体阐述了监控终端的软硬件设计方案、WSN参数的配置和上位机软件的设计。现场应用的结果表明，系统运行稳定、可靠性高，达到防潮的目的。

陈静洁¹ 蔡奕龙² 高伟¹ 郭谋发¹ 张伟骏¹ / 1.福州大学电气工程与自动化学院 2.国网福建石狮市供电有限公司



陈静洁/硕士研究生

关键词/Keywords

变电站·
开关柜·
防潮系统·
露点控制·
WSN·

随着开关技术的发展，高压开关柜的体积越来越小，其绝缘性能显得特别重要。在东南地区由于湿度较大，开关柜内电气设备易凝露积水，导致局部绝缘能力降低而引发各类事故^[1]。

凝露现象是指设备表面温度低于环境露点温度时发生的水汽凝结现象，与所处环境的温度和相对湿度有关。开关设备的防潮，主要是破坏凝露形成的条件，因此，文献[2-4]设定以某一温度或相对湿度（如93%）作为驱潮设备的起停判据，将水蒸气排出，达到降低露点温度的目的，但控制策略单一。文献[5]将测量的温湿度与预存专家知识库进行比较，识别工况并给出对应防凝露的控制方案。文献[6]对上述策略进行改进，提出了一种主动防止凝露的控制方法。但上述做法均未考虑计算实时的露点温度，以间接量（温湿度值）与设定值比较的方法，不能直接反映露点温度和设备表面温度二者之间的联系。

为解决上述问题，本文提出了一种基于露点控制算法的开关柜防潮方案，实时计算露点温度，并将柜内环境温度与露点温度间的差值控制在一定范围，预防凝露积水。同时，建立无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN），实现与上位机软件的信息交互。

露点控制的基本原理

1. 露点温度

露点温度指在空气中水汽含量不变，气压一定的情况下，使空气冷却达到饱和时的温度^[7]。目前，露点温度的计算大多采用饱和水汽压公式反算得到。常用的饱和水汽压公式形式多样，在-45~60℃范围内，通过马格努斯公式的改进形式计算露点温度可得到较好的准确度^[8]，计算公式为

$$E_w = \alpha e^{\left(\frac{\beta T}{\lambda + T}\right)} \quad (1)$$

式中， E_w 为饱和水汽压，hPa，指在当前温度下空气中水汽达到饱和时的水汽分压力； T 为温度值，℃；系数 $\alpha = 6.112$ hPa； $\beta = 17.62$ ； $\lambda = 243.12$ ℃。事实上，空气经常处于未饱和状态，这时水汽所产生的分压力称为水汽压 E ，水汽压 E 和饱和水汽压 E_w 的关系为

$$E = \frac{RHE_w}{100} \quad (2)$$

式中， E 为水汽压，hPa； RH 为相对湿度（%）。未饱和空气的水汽压可认为是某一温度下的饱和水汽压，通过马格努斯公式反算得到的该温度即是未饱和空气的露点温度，表达式为

$$D_p = \frac{\lambda \ln\left(\frac{E}{\alpha}\right)}{\beta - \ln\left(\frac{E}{\alpha}\right)} = \frac{\lambda \ln\left(\frac{1}{\alpha} \frac{RHE_w}{100}\right)}{\beta - \ln\left(\frac{1}{\alpha} \frac{RHE_w}{100}\right)} \quad (3)$$
$$= \frac{\lambda \left\{ \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{\beta T}{\lambda + T} \right\}}{\beta - \left\{ \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{\beta T}{\lambda + T} \right\}}$$

式中， D_p 为露点温度，℃。
由式（3）可知，当前温度和相对湿度决定了露点温度 D_p 。

2. 露点控制算法
规则：通过采集当前环境的温度 T 和相对湿度 RH ，进而计算 D_p ，将 T 与 D_p 的差值控制在一定范围。例如：设大气压强 P 在一段时间内保持不变，此时柜内的相对湿度 $RH=88.52\%$ ， $T=16.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，计算可得露点温差为

$$\Delta T = T - D_p = 16.14\text{ }^{\circ}\text{C} - 14.21\text{ }^{\circ}\text{C} = 1.93\text{ }^{\circ}\text{C}$$

设定起停阈值为 $\Delta T_{up}=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $\Delta T_{down}=6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，则可判断露点温差 $\Delta T < \Delta T_{up}$ ，投切防潮设备排出水汽，直至 $\Delta T > \Delta T_{down}$ 时关闭设备。

系统设计

开关柜防潮系统由监控终端、WSN和上位机软件组成，其中驱潮设备选用100 W的硅橡胶加热板。系统结构框图如图1所示。

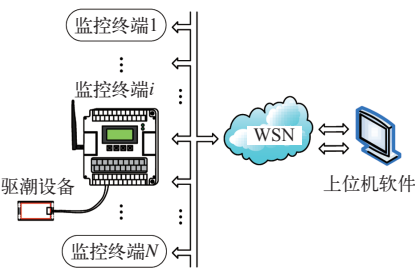


图1 开关柜防潮系统结构框图

监控终端采集开关柜内温湿度值，根据露点控制原理，控制加热板工作，使露点温度始终低于柜内设备表面温度，达到防潮防凝露的目的；终端与上位机间采用基于ZigBee技术的无线传感器网络通信，实现非接触式网络化信息交互；上

位机用于存储和管理实时数据，具有数据召测、参数设置和加热板运行状态远程控制等功能。

监控终端设计

1. 硬件设计

监控终端包括微处理器、温湿度采集、无线通信模块、按键输入、LCD显示、继电器输出驱动和电源模块，设计框图如图2所示。

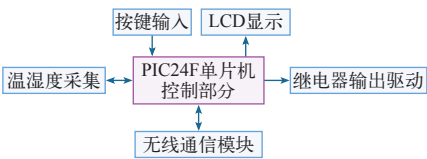


图2 终端的设计框图

(1) 微处理器

MCU选用Microchip公司开发的16位单片机PIC24FJ64G004，该款芯片具备UART接口、I/O资源丰富、封装体积小和高集成度低成本等优势。PIC24F引脚资源分配如表1所示。

表1 PIC24F引脚资源分配表

设计	引脚定义	引脚功能
温湿度数据采集	RB7~RB8	数据线DATA、时钟线SCK
无线通信	RB2~RB3	UART接收端、UART发送端
按键输入	RC6~RC9	按键[确认，退出，上(▲)，下(▼)]
LCD显示	RA0~RA1、RB0~RB1	4条控制线，分别是使能线、读/写线、选择线和液晶背光控制
	RB10~RB15、RA7、RA10	8条控制LCD显示的数据线
LED显示	RC0~RC1	加热板状态灯，无线通信闪烁灯
继电器输出	RA4、RA9	控制加热板的继电器输出和COM端

(2) 温湿度采集模块

由于开关柜柜内空间紧凑、走线密集，要求温湿度传感器具有集成度高、体积小和可安装在柜内任意位置等特点，故选用Sensirio公司CMOSenm技术的SHT11，性能参数见文献[9]。SHT11提供两线串行接口SCK、DATA与单片机连接，系统使用单片机的2根通用I/O线模拟IIC总线的工作时序，完成对温、湿度数据的采集。

(3) 无线通信模块

以往大多采用有线通信技术实现设备间的数据传输,但对于封闭式开关柜而言,有线通信模式存在施工量大,布线困难等问题。WSN作为一种新的数据采集技术,具有低功耗、低成本、分布式监测和自组网等优点,能有效解决上述问题。因此,本文将WSN应用于开关柜防潮系统,并选择ZigBee技术组网。

设备选用Digi公司的XBee-PRO ZB RF模块,简称XBee模块,技术参数见文献[10]。该模块支持基于IEEE 802.15.4标准的ZigBee协议,体积小,功耗低,接口简单,传输距离最大可达150 m。通过PIC单片机的UART接口与XBee模块相连,其引脚DIN、DOUT用于数据的传输,连接图如图3所示。

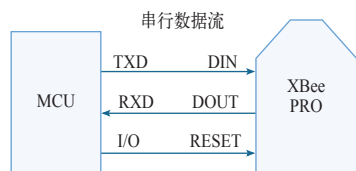


图3 PIC单片机和XBee模块的连接图

(4) 电源模块

将AC 220 V的电压转换成不同电压等级的直流电压供单片机和各个模块使用,其中3.3 V为单片机、无线通信模块和温湿度采集模块供电;5 V为LCD模块供电;12 V为继电器输出驱动供电,设计框图如图4所示。

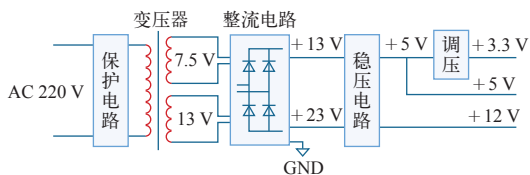


图4 电源模块的设计框图

图4中,保护电路装有高压瓷片电容、压敏电阻、共模电感、磁珠和自恢复保险丝,具有抑制高频噪声、过滤电磁干扰、过电压保护和过电流保护等功能;稳压电路选用LM2596电源降压调整器;调压电路选用SPX1117调压芯片。

(5) 其他模块

系统其他功能模块包括继电器输出驱动、按

键输入和LCD显示,硬件设计和常规方式相同。

2. 软件设计

(1) 主程序设计

将各功能模块化,分成各个独立子程序。主程序通过分时扫描,定时执行各个子程序。流程如图5所示。

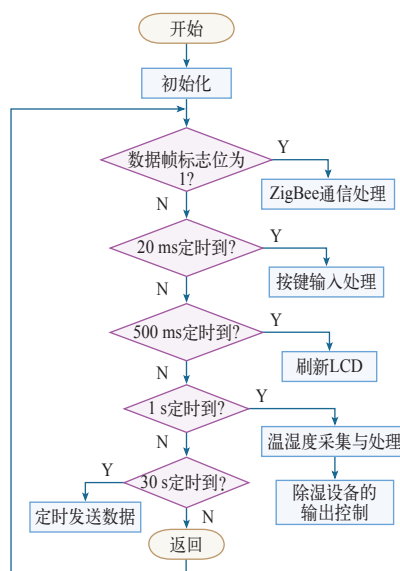


图5 主程序的流程图

设定一个20 ms基准定时器,提供给整个程序调用,其余定时器通过对基准定时器的累积实现,节约单片机资源。

按键输入处理采用20 ms定时扫描工作方式,省去等待按键的延时消抖过程。当程序检测到第 n 次与第 $n-1$ 次状态不一致时,表示有按键按下,接着再去检查按下的键名,并执行相应的功能。在4个按键中, [上(▲)]和[下(▼)]用于功能的选择和参数的修改, [确认]用于进入设置状态和保存设置, [退出]则还原并退出设置状态。

1 s的定时任务主要完成温湿度数据的采集、处理。采集到的数据需进行补偿和滤波方可得到较为准确的温湿度值,补偿公式见文献[9],滤波处理采用滑动平均滤波法。

每隔500 ms刷新一次LCD显示屏,内容包括控制模式、温湿度值、露点温度和起停差值;每隔30 s向上位机发送一次信息,内容包括温度、湿度和加热板的运行状态。

(2) ZigBee通信处理

ZigBee通信处理是通过单片机UART串口接收并处理由上位机软件下发的指令。由于各个指令的格式和长度都不尽相同,而UART的接收模式为单字节接收,因此,如何判别一笔完整的数据帧已经接收完成是通信处理的关键。考虑到每笔帧之间的时间间隔大于4.5字节的时间,再加上起始位和停止位,程序在响应每个字节的接收中断中启动一个定时器,定时时间为

$$T = 4.5 \times (8 + 2) \times \frac{1}{9600} \text{ ms} = 4.688 \text{ ms}$$

帧识别示意图如图6所示。在图6中,由于同帧相邻字节间的时间间隔 T_1 小于周期值 T ,定时器不响应定时中断,而相邻帧前后字节的时间间隔 T_2 大于定时器周期值 T ,计数寄存器溢出响应定时中断子程序,置数据帧标志位为1,表示一笔完整的数据帧已接收完成。

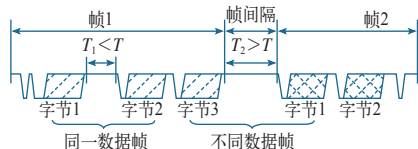


图6 帧识别示意图

每次循环扫描检测到有数据帧标志位后,按照规约解析数据帧,根据不同的控制码执行相应指令的子程序,流程图如图7所示。

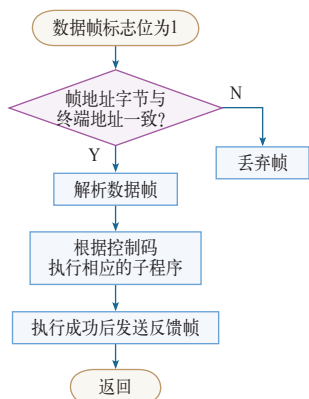


图7 数据帧处理的流程图

(3) 除湿设备的输出控制

监控终端支持手/自动切换控制除湿设备的工作状态。在自动模式下,终端根据露点控制算

法对加热板的运行状态进行控制,达到防潮的目的;在手动模式下,可通过终端按键或上位机指令强制起停加热板,加热板定时运行2 h后,切换回自动模式,实现了人为适时的干预,进一步保障柜内运行环境的安全性。

(4) 非易失性数据读写

为了防止突然断电导致的数据丢失,系统需要保存起停阈值和地址信息。尽管PIC24F系列单片机没有E²PROM,但可通过仿真算法将非易失性数据写到程序存储器中。

Microchip提供了库文件DEE Emulation及Flash Operations来实现这个功能,需要用到的函数为void DataEEInit (void); unsigned int DataEERead (unsigned int addr); unsigned char DataEEWrite (unsigned int data, unsigned int addr)。

函数说明如下:DataEEInit为初始化函数,找到一个当前页;DataEERead为读函数,返回某地址的最新数据;DataEEWrite为写函数,将数据和该数据的地址写入,成功后返回0值。

WSN参数的配置

基于ZigBee技术的WSN有3种网络拓扑结构:星形、簇树形和Mesh网络。系统采用Mesh网络,由协调器、路由器和终端3种通信节点组成。协调器选择一个PAN ID和信道后启动一个网络,每个网络只允许有一个协调器;路由器要配置成与协调器相同的PAN ID和信道才能加入该网络,并能够路由数据;终端不能路由数据,在不收发数据时可以休眠,适用于无供电电源场所^[11]。因开关柜仪表室有电源引接线,系统配置成协调器和路由器节点类型即可,利用配置软件可对XBee模块的节点类型及其他相关参数进行设置。

本系统XBee模块的主要配置参数如表2所示。

上位机软件

上位机软件完成数据存储、远程监控和用户交互等功能,选用Delphi XE2编写。从结构上可分为3种单元:通信单元、数据库单元和应用单元。

通信单元完成数据的通信和规约的解析,并

表2 XBee模块的主要配置参数

参数内容	参数配置	相关配置说明
节点类型	Coordinate	上位机网关XBee模块
	Router	开关柜中监控终端XBee模块
网络地址和信道	ID	64位地址，默认ID=0，可设置的范围为0~0xFFFFFFFFFFFFFFFF
	SC	范围为1~0xFFFF，共16位，每一位代表一个信道，置1使能，置0禁用
	DH	DH=0x0000
目的地址	DL	协调器DL=0xFFFF，路由器DL=0x0000
串行接口	BD 3	3~9600，设置通信波特率为9600bps
	NB 0	0~NO PARITY，无奇偶校验位方式
	SB 0	0~ONE STOP BIT，选择1位停止位
数据传输模式	AT	2种数据传输模式：AT模式和API模式，系统均配置成AT模式

将解析后的信息传递给数据库,亦或转发数据库下行报文。数据库单元分成实时数据库和历史数据库,历史数据库用于存储和管理需要保存的历史数据和设备的配置参数,可供其他应用程序调用数据信息,设计上选用Microsoft Access数据库。实时数据库为内存中开辟的一块特殊区域,用于保存当前数据,供应用程序直接调用,新数据可直接覆盖旧数据。应用程序实现人机交互,界面包括显示各参数曲线图、实时监测平台、通信管理、设备管理、历史数据的记录和分析及报表的打印输出等,利用Delphi环境中的ADO控件连接到数据库,实现对信息的管理和维护。

结束语

基于WSN和露点控制的开关柜防潮系统具有以下优点：①露点算法控制，达到完全预防凝露；②WSN通信，可靠性高，安装方便；③支持远程监控，方便操作。该系统已在部分地区应用，结果表明系统运行稳定、可靠性高，能够满足用户的需求。

参考文献

- [1] 沈建位, 汪家养, 俞慧忠, 等. 高压开关设备凝露控制器的研制 [J]. 电气开关, 2008, 46 (6) : 30-31.
- [2] 周丰群, 张义民, 何超. 电气设备用温度凝露控制器的研制 [J]. 电力自动化设备, 2002, 22 (3) : 61-62.
- [3] 黄绍平, 李玲, 聂渝磊. 基于单芯片传感器的箱式变电站温湿度监控装置的研制 [J]. 高压电器, 2009, 45 (5) : 133-135.
- [4] 孙兴丽, 刘曙光. 一种开关柜智能操控装置的设计与实现 [J]. 高压电器, 2009, 45 (1) : 76-80.
- [5] 周旭强, 汪雄海. 分布式智能型电气开关柜温湿度测控系统 [J]. 电工技术杂志, 2003 (11) : 45-46.
- [6] 姜毅, 周成华, 郭俊峰, 等. 智能端子箱防凝露控制器的研制与试验研究 [J]. 高压电器, 2010, 46 (8) : 59-62.
- [7] 张志富, 希爽. 关于露点温度计算的探讨 [J]. 干旱区研究, 2011, 28 (2) : 275-281.
- [8] Bolton D. The computation of equivalent potential temperature [J]. Monthly weather review, 1980, 108 (7) : 1046-1053.
- [9] 盛世瑞恩. 数字式温湿度传感器SHT 1x/SHT 7x: 含有已校准数字信号输出的温湿度复合传感器 [EB/OL]. [2011-10-10]. <http://www.humidity.cn/images.php?id=9>.
- [10] Digi International Inc. XBee/XBee-pro ZB RF Modules [EB/OL]. http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000976_P.pdf.
- [11] 郭谋发. 采用WSN技术的配电开关柜无线测温系统 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2011, 39 (3) : 415-421.

(收稿日期: 2014-07-12) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告