

# 基于 WSNs 的电站智能开关设备测控系统研究

蒋池剑, 黄凌宇, 王博天, 刘春祥, 范文杰

(山东文登抽水蓄能有限公司, 山东 威海 264200)

**摘要:**为实现电站开关设备的智能化、网络化和无人化管理,基于无线传感器网络(WSNs)技术,构建起电站智能开关设备测控系统,系统以 ZigBee 技术为基础,以 CC3200MCU 为核心,可实现对设备电压(电流)采集、温度采集、状态采集以及分/合闸控制等功能。系统采用 MDS - MAP 定位算法,该算法相比其他定位算法,具有更高的定位精度,针对电站智能开关设备,算法的最佳设置参数为:节点数量设置为 100 个,通讯半径设置为 60 m,锚节点占比设置为 40%,区域大小设置为  $100 \times 100$ 。系统可顺利实现电流/电压采集、温度采集、分闸/合闸、继电器控制、无线传输等功能,温度和电流采集平均误差均小于 0.1%,温度采集平均误差均控制在  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  范围内。为进一步提升系统的监测精度,在系统中植入了温度修正程序,对不同温度区间对采集到的温度值进行校正。

**关键词:**无线传感器网络技术;电站智能开关设备;监控系统;ZigBee;定位算法;误差

中图分类号:TP302

文章编号:1000 - 0682(2025)01 - 0093 - 05

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.01.017

## Research on intelligent switching equipment measurement and control system for power plants based on WSNs

JIANG Chijian, HUANG Lingyu, WANG Botian, LIU Chunxiang, FAN Wenjie

(Shandong Wendeng Pumped Storage Co., Ltd., Shandong Weihai 264200, China)

**Abstract:** In order to achieve intelligent, networked, and unmanned management of power plant switchgear, a power plant intelligent switchgear measurement and control system is constructed based on wireless sensor networks (WSNs) technology. The system is based on ZigBee technology and centered on CC3200MCU. It can achieve functions such as voltage (current) acquisition, temperature acquisition, status acquisition, and opening/closing control of equipment. The system adopts the MDS - MAP positioning algorithm, which has higher positioning accuracy compared to other positioning algorithms. For intelligent switching equipment in power plants, the optimal setting parameters for the algorithm are: the number of nodes is set to 100, the communication radius is set to 60 m, the proportion of anchor nodes is set to 40%, and the area size is set to  $100 \times 100$ . The system can smoothly achieve functions such as current/voltage acquisition, temperature acquisition, opening/closing, relay control, wireless transmission, etc. The average error of temperature and current acquisition is less than 0.1%, and the average error of temperature acquisition is controlled within the range of  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . To further improve the monitoring accuracy of the system, a temperature correction program has been implanted in the system to correct the collected temperature values for different temperature ranges.

**Keywords:** wireless sensor network technology; intelligent switchgear for power plants; monitoring system; ZigBee; positioning algorithm; error

## 0 引言

在大型工厂、发电站、学校、医院、矿场等单位或企业生产运行过程中,需要配备大量的用电设备,这些设备型号众多,功率不一,管理起来十分困难,如

收稿日期:2024 - 06 - 14

第一作者:蒋池剑(1978—),男,汉族,浙江富阳人,本科,高级工程师,主要从事抽水蓄能运维管理工作。

E-mail:jiana49291954@163.com

何实现高效智能化配电成为当前的一大难题。开关设备作为一种组合式电器,通常由继电器仪表室、母线隔室、电缆终端连接室、断路器室等结构组成,可以实现对大部分电气设备的有效测量、控制和保护作用,开关设备对于整个单位/企业电力系统的正常运行具有十分关键的作用<sup>[1-2]</sup>。

然而,随着运营时间的延长,一些开关柜也会出现各种各样的故障,一旦发生故障,会造成单位/企业出现大范围的供电异常,严重影响社会生产和生活。为了预防开关柜出现此类事故,就必须安排大量人员对开关柜运行状态进行定期维检,不仅耗费了大量人力物力,而且巡检效率低下,并不能完全及时有效检测出相关潜在故障<sup>[3-4]</sup>。因此,有必要设计一种智能型开关设备监控系统,此系统可以起到对开关设备的实时监控,最大程度降低事故发生率,而且能够在故障发生时发出控制指令,起到控制保护电路系统的作用。要想实现开关设备的智能监控功能,就需要在开关设备内部嵌入智能系统。由于电路系统线路已经十分复杂,如果再在其中加入各种传感器线路,将极大影响开关设备的使用空间<sup>[5-6]</sup>。无线传感器网络(Wireless Sensor Networks,简称 WSNs)技术可以很好的解决这一问题,WSNs 具有设置灵活、可靠性强、自组织等诸多优点,而且无需设置大量的传输线路,随着 WSNs 定位技术的不断成熟,在通讯效率、稳定性、可靠性方面取得了长足进步,ZigBee、Wi-Fi 等技术在各领域获得了广泛应用,为电站智能开关设备监控系统构建提供了技术支撑<sup>[7-8]</sup>。

该文针对发电站中的智能开关设备,基于 WSNs 技术构建起智能开关设备测控系统,并对该系统的定位算法和功能实现进行了分析和试验验证,可为类似工业电力开关柜的智能监控提供参考。

## 1 系统构建

### 1.1 总体架构设计

测控系统总体架构示意图 1。系统基于 ZigBee 无线传感网络技术进行架构,ZigBee 相比蓝牙和 Wi-Fi,具备更广的传输距离和更高的传输效率,同等情况下,功耗更低<sup>[9]</sup>。电源电池选用了 ER18505 电池直接供电,容量高达 3500mAh,单组电池可以连续使用 1.5~2 年。系统通过电压(电流)采集模块、触头温度采集模块、状态采集模块对智能开关设备进行数据采集,并将监测数据汇

集到 CC3200MCU 主控模块中,CC3200MCU 主控模块通过 ZigBee 与路由器之间实现连接,并将数据通过数据库进行分类保存,可实现数据的实时查看和分析,用户也可通过网页端对主控模块发出指令,对断路器分/合闸状态进行对应控制。整个系统的关键是通过对智能开关设备的准确定位,通过 ZigBee 无线传感技术获取设备运行状态参数,通过监测数据分析结果,再由 ZigBee 无线传感网络发出控制指令,实现对智能开关设备的远程智能控制。

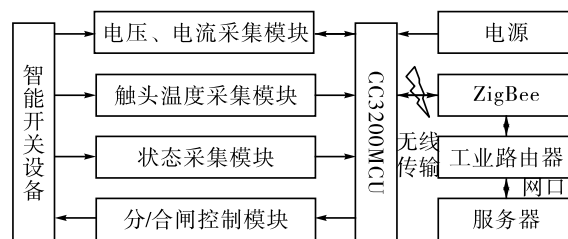


图 1 测控系统总体架构示意

### 1.2 主要功能模块选型设计

系统功能模块具体架构见图 2。主控模块采用 CC3200MCU,该型号为首款内置无线传输网络连接的单片机,具有尺寸小(长 3.04 cm,宽 1.791 cm),功能全,能耗低(活动电流 59~229 mA,休眠电流低至 4  $\mu$ A)等优势,内部包含 802.11b/g/n 射频、MAC、无线网络驱动和基带,支持 STA、AP、P2P 等多种工作模式,该系统采用 SAT 模式进行工作,SAT 工作模式可以很大程度上提升主控模块的数据处理效率,而且 CC3200MCU 中采取 256AES 快速加密方式,这样可以保证系统工作的保密安全性。电压、电流采集模块选用 ATT7022E 高精度芯片对电压和电流进行测量,其中电压的监测有效范围为 0.1~500 mV,电流监测有效范围为 0.1~500 mA。状态检测模块选用 EL817 光电耦合器。抗干扰能力强,可提升系统的监控稳定性。触头温度采集模块选用 R46CA01-BTS,具有低能耗、高精度等特性,工作电压为 3.7~5.5 V,工作电流为 5~8 mA,温度测量范围为 -55~125  $^{\circ}$ C,温度测量精度为  $\pm 0.5$   $^{\circ}$ C,采用 UTC-1212 模块作为无线收发装置,在接收工作模式下,电流消耗量仅为 20  $\mu$ A,最远传输距离可达 700 m,每个电池的预期使用寿命超过 1 年。分/合闸控制模块采用 PC817 光电耦合器对 SRD-03VDC-SL-C 继电器进行控制,当智能开关设备发生异常时,可以对其进行分闸或者合闸操作,分闸和合闸的时间分别  $\leq 50$  ms 和  $\leq 70$  ms。

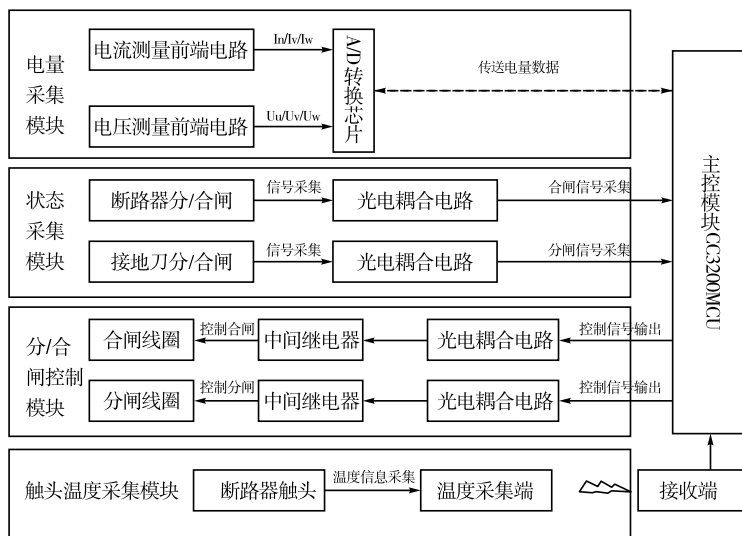


图2 系统功能模块架构示意

## 2 基于 WSNs 的智能开关设备实时定位

### 2.1 定位算法

由于智能开关设备在运行使用过程中的位置并不是固定的,会根据任务需要对智能开关设备的位置进行移动调整,如果仅仅依靠终端设备的地址来实现对智能开关设备进行定位管理,往往很难达到理想效果。因此,在利用无线传感网络设备进行定位管理时,需要引入相关定位算法来实现对智能开关设备的精准定位。常用的无线传感网络定位算法包括 DV - Hop 算法、APIT 算法、MDS - MAP 算法和 Amorphous 算法等。

基于跳数的分布式定位算法(DV - Hop)利用节点间的平均跳距与最小跳数进行相乘来计算两个节点(未知节点与锚节点)之间的距离<sup>[10]</sup>。这种算法计算过程简单,便于发送和接收,无需增加额外设备,但更适用于相对密集且连通度更高的网络。DV - Hop 算法计算原理为:

$$L(i, j) = S_{ij} \times M_{ij} \quad (1)$$

式中: $L(i, j)$ 表示*i*和*j*两节点之间距离; $S_{ij}$ 表示平均每跳的距离; $M_{ij}$ 表示节点*i*和*j*之间的最小跳数。

近似三角形内点测试法(Approximate point - in - triangulation test,简称 APIT)是一种通过判断直通过不断未知节点与周围节点之间的信息是否在定义三角形内部来淘汰掉无用信息,保留有用信息,定义三角形的数量越多(即叠加三角形越多),所占的共同区域越小,则对于节点的定位越准确<sup>[11]</sup>。APIT 算法原理示意图见图3。

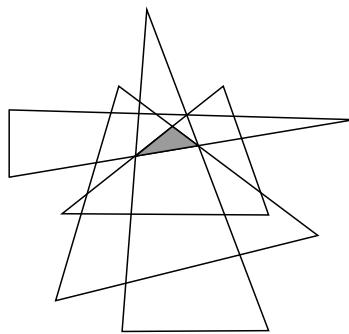


图3 APIT 算法原理

最小距离投影多维缩放(Minimum Distance Projection Multidimensional Scaling,简称 MDS - MAP)算法是一种多维尺度映射的节点定位算法,利用节点与节点之间的距离信息来构建距离矩阵,并将距离矩阵投影到维度更低的空间中,找到最小的投影距离,此最小距离对应的低维空间位置便是节点的实际位置<sup>[12]</sup>。

不定性定位(Amorphous)算法也是一种利用节点间的平均跳距与最小跳数进行相乘来计算两个节点(未知节点与锚节点)之间的距离<sup>[13]</sup>。其计算过程分三个步骤:(1)根据距离矢量交换协议,计算网络中所有未知节点到锚节点的最小跳数  $M_{ij}$ ;(2)将未知节点的通信半径用平均每跳距离  $S_{ij}$  来进行表示,通过平均每跳距离和最小跳数来计算得到未知节点到每个锚节点的距离;(3)最后利用最大似然估计或者三角测量法估计未知节点的实际位置。

### 2.2 算法性能对比

对四种定位算法在不同变量下的定位误差进行对比,见表1。从表1中可知:随着节点数量增加,

定位误差逐渐减小,通讯半径、锚节点占比和区域大小对于不同算法定位准确性表现出不同的变化特征,APIT 算法定位误差随通讯半径增大呈先减后增变化,随着锚节点占比和区域大小增大呈先增后减;DV - Hop 算法定位误差随通讯半径增大呈先增后增变化,随着锚节点占比和区域大小增大呈先减后增,MDS - MAP 算法定位误差随通讯半径增大逐渐减小,随锚节点占比增大先减后增,随区域增大逐渐增大;Amorphous 算法定位误差随通讯半径和锚节点占比增大逐渐增大,随区域增大先增后减;相同节点数量、相同通讯半径、相同锚节点占比以及区域大小情况下,MDS - MAP 算法的定位误差均是最小的,表明 MDS - MAP 定位算法更契合该系统的实际运用情况,因此该系统选用 MDS - MAP 定位算法作为智能开关设备的定位算法,且节点数量设置为 100 个,通讯半径设置为 60 m,锚节点占比设置为 40%,区域大小设置为 100 × 100。

表 1 不同定位算法误差对比情况

变量	数量	算法类型			
		APIT	DV - Hop	MDS - MAP	Amorphous
节点/个	60	0.363 9	0.355 3	0.055 1	0.352 3
	80	0.359 1	0.187 8	0.067 3	0.320 6
	100	0.320 6	0.309 9	0.025 6	0.222 0
通讯半径/m	40	0.460 9	0.226 8	0.003 6	0.273 5
	50	0.348 1	0.292 4	0.003 2	0.364 7
	60	0.500 7	0.262 9	0.001 3	0.378 0
锚节点占比/%	30	0.441 3	0.257 5	0.003 1	0.383 4
	40	0.500 7	0.244 5	0.001 3	0.388 4
	50	0.374 6	0.272 6	0.002 8	0.415 5
区域大小/m	80 × 80	0.365 5	0.258 0	0.001 1	0.383 9
	100 × 100	0.500 7	0.244 5	0.001 3	0.388 4
	150 × 150	0.343 3	0.264 5	0.018 8	0.254 7

### 3 系统功能测试

#### 3.1 上电测试

以 CC3200 为主系统,搭载 ATT7022E 芯片、R46CA01 - BTS、SRD - 03VDC - SL - C 继电器、SV 供电、UART 通信设备等作为测控电路板,对其进行上电测试,见图 4。测试结果表明:测控电路板的电流/电压采集功能、温度采集功能、分闸/合闸功能、继电器控制功能、无线传输功能均能顺利实现,表明系统采用 CC3200 作为主控模块是合理可行的。

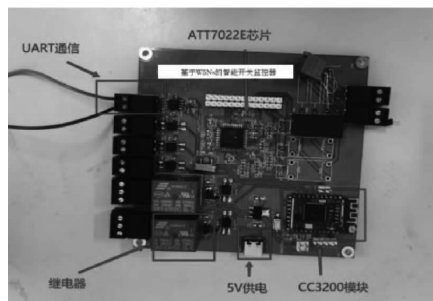


图 4 上电测控电路板

#### 3.2 电量采集功能测试

利用系统的电量采集模块对 100 V 模拟电压和 5 A 模拟电流进行数据采集,共采集 10 次,结果见图 5。从图 5 中可知:10 次测试中,电压测试结果为 99.933 ~ 100.087 V,误差为 -0.067 ~ 0.087 V,电流测试结果为 4.993 ~ 5.006 A,误差为 -0.007 ~ 0.006 A,电压平均绝对误差为 0.052 V,电流平均绝对误差为 0.004 1 A,电压和电流的平均误差均低于 0.1%,由此可见,系统电量采集模块具有很高的检测精度,满足使用要求。

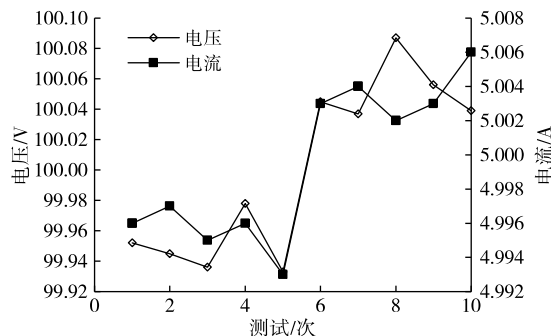


图 5 电量采集测试结果

#### 3.3 状态及控制功能测试

采用外接灯泡方式对系统状态和控制功能进行测试,见图 6。状态测试主要针对断路器和接地刀闸的分合闸状态进行测试,当断路器处于合闸状态时,灯泡处于亮灯状态,此时客户端能够观测到各个状态监测点的实时变化情况,说明系统可以通过无线传输方式将系统状态发送到客户端供运维人员参考,运维人员可以实时观测到系统分合闸状态。控制功能主要针对断路器的分合闸控制,向系统输入超限值的低电压和高电流,观察灯泡状态,发现灯泡和发光二极管均在闪亮 1 s 左右时间自动熄灭,同时在客户端发出了报警信号,说明此时系统监测到故障状态,故而迅速做出继电保护动作。

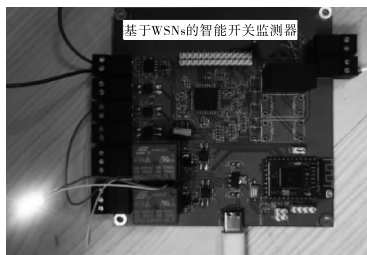


图6 状态及控制功能测试

### 3.4 无线温度采集功能测试

利用系统温度采集端对加热棒加热过程进行温度采集,结果见图7。从图7中可知:系统温度触头采集到的温度与实际温度基本一致,误差较小,均控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 范围内。为了提高系统温度监测的可靠性,对系统植入了温度修正程序,按照不同温度区间对采集到的温度值进行校正<sup>[14]</sup>,具体情况为:当监测温度 $< 10^{\circ}\text{C}$ 时,校正值为 $-0.4^{\circ}\text{C}$ ,当监测温度为 $10 \sim 22^{\circ}\text{C}$ 时,校正值为 $-0.3^{\circ}\text{C}$ ,当监测温度为 $22 \sim 29^{\circ}\text{C}$ 时,校正值为 $-0.2^{\circ}\text{C}$ ,当监测温度为 $29 \sim 37^{\circ}\text{C}$ 时,校正值为 $-0.1^{\circ}\text{C}$ ,当监测温度为 $37 \sim 48^{\circ}\text{C}$ 时,校正值为 $0^{\circ}\text{C}$ ,当监测温度为 $48 \sim 55^{\circ}\text{C}$ 时,校正值为 $+0.1^{\circ}\text{C}$ ,当监测温度为 $55 \sim 64^{\circ}\text{C}$ 时,校正值为 $+0.2^{\circ}\text{C}$ ,当监测温度为 $64 \sim 73^{\circ}\text{C}$ 时,校正值为 $+0.3^{\circ}\text{C}$ ,当监测温度为 $> 73^{\circ}\text{C}$ 时,校正值为 $+0.4^{\circ}\text{C}$ 。

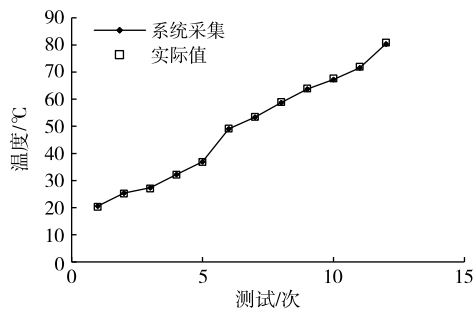


图7 温度采集测试结果

## 4 结论

(1)基于 ZigBee 无线传感网络技术构建电站智能开关设备测控系统,系统以 CC3200MCU 为主控模块,由电压(电流)采集模块、触头温度采集模块、状态采集模块、分/合闸控制模块组成,可实现对智能开关设备远程监测与控制。

(2)为了实现系统对智能开关设备的精准定位,对 DV-Hop、APIT、MDS-MAP 和 Amorphous 四种无线传感网络定位算法性能进行了对比研究,MDS-MAP 算法预测精度最高,且最佳参数设置情况为:节点数量设置为 100 个,通讯半径设置为 60 m,锚节点

占比设置为 40%,区域大小设置为  $100 \times 100$ 。

(3)对系统进行了上电、电量采集、状态及控制、温度采集功能测试,系统可以事项各项预定功能,电压和电流的平均采集误差均低于 0.1%,在异常状态下,系统可以迅速做出继电保护动作,温度采集误差均控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 范围内,并根据测试结果对不同温度段内设置了温度校正,从而提升系统的整体监测精度。

### 参考文献:

- [1] 李志,余绍峰,彭佳盛,等.考虑开关设备和馈线自动化模式的配电网弹性评估方法[J].电力建设,2024,45(01):83-91.
- [2] 林家栋,秦方博,刘彬博,等.基于VR技术的开关柜倒闸操作实训系统设计[J].微型电脑应用,2024,40(05):9-12.
- [3] 刘嘉欣,于浩,莫中岳.高压开关柜局部放电故障缺陷诊断技术分析[J].机械设计与制造工程,2022,51(10):97-100.
- [4] 何明,余乐欣,严铿博,等.基于改进深度学习的开关柜局部放电检测与故障识别[J].微型电脑应用,2024,40(01):123-126.
- [5] 孙澄宇.基于PHM技术的智能开关柜监测及诊断系统的平台设计[J].电测与仪表,2015,52(24):112-120.
- [6] 虞金花,章国宝.一种智能开关柜监控系统高效数据传输控制方法[J].工业控制计算机,2014,27(09):44-45+47.
- [7] 何章玮.电力设备状态监测数据融合算法分析[J].能源与环保,2022,44(05):162-167.
- [8] 柴西林,张婧,邵照勇,等.基于无线传感网及边缘网关的智慧农业大棚监控系统设计[J].工业仪表与自动化装置,2024(01):13-17+33.
- [9] 胡凯波,许林波,夏志凌.基于ZigBee技术高压开关柜温度在线监测系统研究[J].自动化与仪表,2020,35(02):100-103+108.
- [10] 王玟婕,蔡立涛,蔡钰戴,等.基于DV-Hop的大规模WSN定位方法研究[J].物联网技术,2024,14(03):20-23+29.
- [11] 李云鹏.基于APIT的无线传感器网络混合定位算法[J].计算机系统应用,2021,30(10):254-258.
- [12] 张露,范伟,韩双霞,等.WSN中基于MDS-MAP的分布式定位算法设计与实现[J].计算机与数字工程,2013,41(06):876-879.
- [13] 李祝红,杨安东,赵灿明,等.基于GA-TS优化Amorphous算法的无线传感网络定位[J].电气自动化,2020,42(05):105-108.
- [14] 姚震.基于红外技术的开关柜电气接头温度监测系统[J].工业仪表与自动化装置,2021(01):23-25+47.